

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TENSÃO
EM
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA**

António Carvalho de Andrade

Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Doutor
em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Dissertação realizada sob a supervisão do
Professor Doutor Fernando Pires Maciel Barbosa,
do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Setembro de 2005

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor Fernando Pires Maciel Barbosa, quero especialmente agradecer pelo seu incentivo, apoio e disponibilidade, que sempre teve, bem como a confiança que sempre me transmitiu.

Agradeço também aos Professores Doutores José Rui Ferreira e José Nuno Fidalgo pelo esclarecimentos e sugestões que me permitiram solucionar alguns problemas surgidos no desenvolvimento deste trabalho.

À Vice-Presidente do IPP Doutora Maria de Fátima Lopes da Silva Ramos Morgado e aos Conselhos Científicos do ISEP e do DEE, pelo apoio para a realização deste trabalho de Doutoramento.

À minha família pelo estímulo e pela compreensão que sempre me deram.

Ao programa PRODEP III do Ministério da Educação pelo apoio financeiro desta acção de formação.

Agradeço, também, a todos aqueles que, através das suas sugestões, dúvidas e críticas, me ajudaram ao longo deste trabalho.

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio e co-financiamento do Fundo Social Europeu através do programa PRODEP III, medida 5 (FSE) Formação de Docentes e Outros Agentes, Acção 5.3 – Formação de Docentes do Ensino Superior.



RESUMO

O objectivo desta dissertação de Doutoramento foi o estudo da estabilidade de tensão de Sistemas Eléctricos de Energia, nomeadamente o problema da determinação de índices de estabilidade de tensão e da distância ao ponto de colapso.

Foram estudados e analisados os diversos factores que condicionam a estabilidade de tensão de um SEE e formas de a melhorar.

Foi em particular estudado um novo índice FSQV, *Full Sum $\delta Q/\delta V$* . Estudaram-se nomeadamente, as curvas FSQV características, referentes às redes utilizadas, ao longo do processo de carregamento até ao colapso. Prova-se que o andamento das curvas FSQV, está associado aos limites de produção de energia reactiva dos geradores síncronos ou de outras fontes de energia reactiva.

É também apresentado um novo método de detecção do ponto de colapso de tensão de redes eléctricas, baseado no comportamento do valor FSQV junto ao referido colapso.

Apresenta-se a aplicação deste novo método a estudos de estabilidade de tensão, concretamente a estudos de contingências de linhas, transformadores, geradores e baterias de condensadores.

Analisa-se, em particular, a aplicação do novo método FSQV para o estudo do planeamento da expansão da produção de energia reactiva.

É também apresentado um novo índice global de distância ao colapso NIVCP - *New Index to Voltage Collapse Point*, para aplicação nos estudos de estabilidade de tensão.

As redes neuronais foram utilizadas para desenvolver uma ferramenta para a obtenção da distância do ponto de funcionamento actual ao colapso de tensão. Desta forma, pretende-se ultrapassar o elevado tempo necessário para a realização de fluxos de carga, nas redes de grande dimensão, neste tipo de cálculo.

Palavras chave: Sistemas Eléctricos de Energia; Estabilidade de Tensão; Controlo de Tensão; Índices de Estabilidade de Tensão; Distância ao ponto de colapso.

ABSTRACT

The objective of this work was to study the voltage stability problem in Power Systems. The main propose was to analyse stability indices and the distance to the collapse point. Factors that can improve the voltage stability were analysed too.

Continues power flow was used to calculate the characteristics of FSQV curves for two IEEE test system until the collapse point being reached. It was possible to prove that FSQV curve is dependant of the reactive power generator limits. Based on the FSQV behaviour near the collapse point, a new method to detect the voltage collapse point is proposed for voltage collapse prevention control in power systems. A new index FSQV, *Full Sum $\delta Q/\delta V$* was studied.

This new method was applied to voltage stability studies. Lines, transformer, generator or capacitive shunt contingencies were considered. The new FSQV method was used for the reactive generation planning studies too.

Neural networks were used to evaluate the distance to point of collapse and results were compared with power flow continuous formulation. The objective was to reduce the power flow time in large power systems.

Keywords: Power system; Voltage stability; Voltage control; Voltage stability index; Collapse point.

RESUMÉE

L'objectif de cette thèse de Doctorat été l'étude de la stabilité de tension des Systèmes Électriques d' Energie (SEE), nommément le problème de la détermination des indices de stabilité de tension et de la distance au point de collapse.

Dans ce travaille, on a étudié et analysé les divers facteurs que conditionnent la stabilité de tension d'un SEE et les méthodologies pour la perfectionner

On a étudié en particulièrement un nouveau indice FSQV, *Full Sum Q/ V*, nommément les courbes FSQV caractéristiques, relatifs aux réseaux utilisées, dans le développées du procès de chargement jusqu'au moment du collapse. On démontre que la conduite des courbes FSQV, est associé aux limites de production d'énergie réactive des générateurs synchroniques ou d'autres sources d'énergies réactif.

On présent aussi une nouvelle méthode de détection du point de collapse de tension des réseaux électriques, fondée dans le conduit du valeur FSQV tout proche du déjà cité collapse.

On présente l'application de ça nouvelle méthode a études de stabilité de tension, mais concrètement a études de contingence de lignes, transformateurs, générateurs et batteries de condensateurs.

On analyse, particulièrement, l'application de ça nouvelle méthode FSQV pour l'étude du plan de la expansion de la production d'énergie réactif.

On présente aussi, un nouvel indice global de distance au point du collapse NIVCP - *New Index to Voltage Collapse Point*, pour l'application dans l'étude de stabilité de tension.

Les réseaux neuronaux étaient utilisées pour développer une outil pour la détermination de la distance du point de fonctionnement actuelle jusqu'au collapse de tension. De cette façon, le très élevé temps de calcul normalement nécessaire pour la réalisation de flux de charge, dans les réseaux de grands dimensions peuvent être plus diminué.

Mots Clés: Systèmes Électriques d'energie; Stabilité de Tension; Contrôle de Tension; Indices de Stabilités de Tension; Distance au point de collapse

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO -----	1
1.1 Considerações Gerais -----	3
1.2 Objectivo do trabalho -----	6
1.3 Estrutura da dissertação -----	7
2. ESTABILIDADE DE TENSÃO -----	9
2.1 Introdução -----	11
2.2 Métodos de controlo da tensão -----	13
2.2.1 Geradores Síncronos -----	13
2.2.1.1 Modelo Matemático -----	14
2.2.1.2 Limites de capacidade de produção de energia reactiva -----	15
2.2.1.3 Os diagramas QV -----	20
2.2.1.4 Os AVR -----	21
2.2.2 Baterias de condensadores -----	23
2.2.3 Transformadores com tomadas de regulação em carga -----	25
2.2.4 <i>Static Var Compensators</i> -----	27
2.2.5 Compensadores síncronos -----	29
2.2.6 <i>STATCON (STATic synchronous CONDenser)</i> -----	29
2.2.7 <i>TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation)</i> -----	29
2.2.8 <i>UPFC (Unified Power Flow Controller)</i> -----	30
2.3 Comportamento das cargas eléctricas -----	30

2.4 Controlo preventivo do colapso de tensão -----	31
2.4.1 Estados de operação de um SEE -----	31
2.4.2 Medidas de controlo preventivo do colapso de tensão -----	34
2.5 Métodos de análise de estabilidade de tensão -----	35
2.5.1 Índices de distância ao colapso de tensão -----	37
2.6 A grandeza FSQV -----	43
2.6.1 O modelo matemático de fluxos de carga -----	43
2.6.2 A grandeza FSQV -----	48
2.6.3 Detecção automática do ponto de colapso -----	50
2.6.4 Justificação teórica para o erro nulo do valor FSQV junto ao ponto de colapso -	53
2.7 Conclusões -----	58
 3. A ESTABILIDADE DE TENSÃO E OS APAGÕES – UM CASO DE ESTUDO, O APAGÃO DE 14 DE AGOSTO DE 2003 -----	 61
3.1 Introdução -----	63
3.2 Porque acontecem os apagões -----	64
3.2.1 As interrupções de energia no SEE Português -----	64
3.2.2 As interrupções de energia mais severas ocorridas no SEE Americano -----	68
3.3 O SEE Americano -----	72
3.4 O contexto antes do apagão -----	77
3.5 O apagão -----	84
3.6 Causa que provocaram o apagão e recomendações para evitar ou minimizar futuros apagões -----	87
3.7 Conclusões -----	89

4. REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS -----	91
4.1 Introdução -----	93
4.2 Inspiração Biológica: O Cérebro Humano -----	94
4.3 Modelo do neurónio artificial -----	95
4.4 Tipos de Funções de Activação -----	99
4.5 Arquitectura da rede neuronal -----	101
4.6 Aprendizagem de uma rede neuronal -----	104
4.6.1 Definição do erro-correcção de um processo de aprendizagem -----	105
4.7 Perceptrão de Camada Simples -----	107
4.8 Perceptrão de Multicamada -----	113
4.8.1 O Algoritmo Retro-Propagação -----	114
4.9 Conclusões -----	122
5. RESULTADOS NUMÉRICOS E ANÁLISE CRÍTICA -----	125
5.1 Descrição dos sistemas utilizados -----	128
5.2 Os perfis de tensão dos barramentos -----	130
5.2.1 Os perfis de tensão nos barramentos da rede de teste de 14 barramentos -----	130
5.2.2 Perfis de tensão nos barramentos da rede de testes de 57 barramentos -----	135
5.3 A identificação dos barramentos críticos -----	140
5.3.1 Identificação dos barramentos críticos da rede de testes de 14 barramentos ----	141
5.3.2 A identificação dos barramentos críticos da rede de testes de 57 barramentos -	143

5.4 UM NOVO MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DO COLAPSO DE TENSÃO -----	145
5.4.1 A grandeza FSQV -----	145
5.4.2 Curvas FSQV com vários cenários de carga -----	150
5.4.3 Uma segunda abordagem da detecção do ponto de colapso com o método FSQV e com vários cenários de carga -----	158
5.4.3.1 Curvas FSQV com vários cenários de carga definidos para a rede de testes de 14 barramentos (2ª abordagem) -----	159
5.4.3.2 Curvas FSQV com vários cenários de carga definidos para a rede de testes de 57 barramentos (2ª abordagem) -----	161
5.4.4 Limite do aumento de carga base definindo um erro máximo para a grandeza FSQV -----	169
5.4.4.1 Limite do aumento de carga base para um barramento definindo um erro máximo para a grandeza FSQV -----	169
5.4.4.2 Limite do aumento de carga base em dois barramentos definindo um erro máximo para a grandeza FSQV -----	179
5.5 ESTUDO DE CONTINGÊNCIAS UTILIZANDO O MÉTODO FSQV -----	182
5.5.1 Estudo de contingências de linhas/transformadores -----	182
5.5.1.1 Estudo de contingências de linhas/transformadores de 1º nível -----	183
5.5.1.1.1 Estudo de contingências de linhas/transformadores de 1º nível provocadas no ponto de carga base -----	183
5.5.1.1.2 Estudo de contingências de linhas de 1º nível provocadas num ponto de carga arbitrário -----	192
5.5.1.2 Estudo de contingências de linhas de 2º nível -----	199
5.5.2 Estudo de contingências de geradores -----	205
5.5.2.1 Estudo de contingências de geradores de 1º nível -----	205

5.5.2.1.1 Estudo de contingências de geradores de 1º nível provocadas no PC 1 -----	205
5.5.2.1.2 Estudo de contingências de geradores de 1º nível provocadas no PC arbitrário -----	215
5.5.2.2 Estudo de contingências de geradores de 2º nível -----	219
5.6 PLANEAMENTO DA EXPANSÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA REACTIVA UTILIZANDO O MÉTODO FSQV -----	222
5.7 O NOVO ÍNDICE DE DISTÂNCIA AO COLAPSO NIVCP -----	225
5.8 Conclusões -----	228
6. RESULTADOS NUMÉRICOS DA APLICAÇÃO DE REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS -----	231
6.1 Motivação para a aplicação de uma RNA no cálculo da distância ao colapso de SEE -	233
6.2 Aplicação de RNA no cálculo da distância ao colapso de SEE -----	234
6.2.1 Dados para a aprendizagem da rede neuronal -----	235
6.2.1.1 Cálculo dos dados para a aprendizagem da rede neuronal -----	235
6.2.1.2 Normalização dos dados para a aprendizagem da rede neuronal -----	241
6.2.2 A aprendizagem da rede neuronal -----	241
6.2.2.1 A aprendizagem da primeira rede neuronal -----	242
6.2.2.2 Aprendizagem da segunda rede neuronal -----	249
6.2.2.3 Aprendizagem da terceira rede neuronal -----	254
6.2.2.4 Aprendizagem da quarta rede neuronal -----	258
6.3 Conclusões -----	262

7. CONCLUSÕES	265
7.1 Síntese do trabalho e conclusões	267
7.2 Perspectivas de desenvolvimentos futuros	271
 BIBLIOGRAFIA	 273
 ANEXO A	 A1
 ANEXO B	 B1
 ANEXO C	 C1

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 – Diagrama PQ de um gerador síncrono com o limite térmico da corrente do estator definido -----</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.2 – Diagrama PQ de um gerador síncrono com o limite térmico da intensidade de corrente do rotor definido -----</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.3 – Diagrama PQ de um gerador síncrono com a região do limite térmico, com o gerador subexcitado definido -----</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.4 – Diagramas PQ de um gerador síncrono com arrefecimento a hidrogénio -----</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.5 – Diagrama QV de um gerador síncrono -----</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.6 – Diagrama de blocos de um AVR -----</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.7 – Curvas PV para diferentes valores de compensação com baterias de condensadores em paralelo -----</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.8 – Compensação paralela com ligação das baterias de condensadores através de um terciário (a) ou directamente (b) -----</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.9 – Esquema unifilar de dois transformadores MAT/MAT com regulação em carga (esquema parcial de uma subestação) -----</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.10 – Esquema unifilar de um transformador MAT/AT com regulação em carga (esquema parcial de uma subestação) -----</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.11 – Curvas PV com compensação realizada por um SVC -----</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2.12 – Sistema estático de compensação SVC -----</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.13 – Característica VI de um SVC -----</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.14 – Estados de operação onde pode residir um sistema eléctrico -----</i>	<i>32</i>
<i>Figura 2.15 – Curva PV de variação da tensão com a carga -----</i>	<i>38</i>
<i>Figura 2.16 – Gráfico do método da continuação -----</i>	<i>40</i>
<i>Figura 2.17 – Gráfico do método da continuação preditor-corrector -----</i>	<i>41</i>
<i>Figura 2.18 – Fluxograma para o FC pelo método de Newton-Raphson -----</i>	<i>47</i>
<i>Figura 2.19 – Fluxograma para o FC contínuo pelo método de Newton-Raphson -----</i>	<i>49</i>
<i>Figura 2.20 – Número de iterações necessárias para convergência da rede de testes de 57 barramentos do IEEE -----</i>	<i>51</i>

<i>Figura 2.21 – Curvas de erros da comparação dos valores FSQV e valores da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} dos barramentos 2 e 3, referentes respectivamente aos cenários B1 e B6 (simulações realizadas com a rede de testes de 57 barramentos do IEEE) -----</i>	53
<i>Figura 2.22 – Curvas de erros da comparação dos valores FSQV e valores da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} dos barramentos 1 a 57, respectivamente dos cenários B1 e B6 (simulações realizadas com a rede de testes de 57 barramentos do IEEE) -----</i>	54
<i>Figura 2.23 – Curvas de erros da comparação dos valores FSQV e da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} dos barramentos 1 a 10, respectivamente dos cenários B1 e B6 (simulações realizadas com a rede de testes de 57 barramentos do IEEE) -----</i>	55
<i>Figura 2.24 – Curvas de erros da comparação dos valores FSQV e da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} dos 14 barramentos, referentes respectivamente aos cenários A1 e A9 (simulações realizadas com a rede de testes de 14 barramentos do IEEE) -----</i>	56
<i>Figura 2.25 – Curvas de erros da comparação dos valores FSQV e da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} dos 14 barramentos, referentes respectivamente aos cenários A1 e A9 (simulações realizadas com a rede de testes de 57 barramentos do IEEE) -----</i>	57
<i>Figura 3.1 – O tempo de interrupção equivalente das interrupções ocorridas na rede de transporte portuguesa [REN04] -----</i>	67
<i>Figura 3.2 – Interrupções mais importantes ocorridas no SEE Norte America no período de 1994 a 1997 -----</i>	68
<i>Figura 3.3 – Os três SEE norte-americanos que constituem “the grid” -----</i>	73
<i>Figura 3.4 – Conselhos regionais da NERC -----</i>	74
<i>Figura 3.5 – Regiões da NERC e Control Áreas -----</i>	75
<i>Figura 3.6 – Reliability Coordinators da NERC -----</i>	77
<i>Figura 3.7 – Produção de energia activa e reactiva do grupo 5 da central de Eastlake no dia 14 de Agosto -----</i>	80
<i>Figura 3.8 – Produção, cargas e transferências entre regiões às 15.05 horas do dia 14 de Agosto -----</i>	81
<i>Figura 3.9 – Efeitos cumulativos dos disparos das linhas de 345 kV nas linhas de 138 kV -----</i>	83
<i>Figura 3.10 – Produção e reservas de energia reactiva nas áreas de Ohio e adjacentes -----</i>	84
<i>Figura 3.11 – Taxa de saídas de serviço de linhas e geradores durante o apagão -----</i>	85
<i>Figura 3.12 – Intervalos de variação da frequência -----</i>	86
<i>Figura 4.1 – Estrutura de um neurónio biológico -----</i>	94
<i>Figura 4.2 – Diagrama de blocos do neurónio artificial -----</i>	95
<i>Figura 4.3 – Diagrama de blocos do neurónio artificial (2º modelo) -----</i>	97

<i>Figura 4.4 – Regras básicas para a construção de gráfico de redes neuronais</i> -----	98
<i>Figura 4.5 – Gráfico do neurónio artificial</i> -----	99
<i>Figura 4.6 – Funções de Activação de redes neuronais</i> -----	100
<i>Figura 4.7 – Arquitectura de uma Rede Neuronal Unidireccional de uma camada</i> -----	102
<i>Figura 4.8 – Arquitectura de uma RNU de várias camadas com a topologia 4-4-2</i> -----	103
<i>Figura 4.9 – Arquitectura de uma Rede Neuronal Recorrente</i> -----	104
<i>Figura 4.10 – Ilustração do erro-corrector na aprendizagem de uma RNU</i> -----	105
<i>Figura 4.11 – Classes com separação linear (a) e sem separação linear (b)</i> -----	108
<i>Figura 4.12 – Hiperplano de Fronteira de decisão para o reconhecimento de padrões de duas classes</i> -----	109
<i>Figura 4.13 – Diagrama de blocos de uma rede neuronal perceptrão para o reconhecimento de padrões de duas classes de fruta</i> -----	109
<i>Figura 4.14 – Vectores que caracterizam os dois tipos de fruta e o hiperplano de separação das duas classes</i> -----	111
<i>Figura 4.15 – Arquitectura de uma rede neuronal PMC com duas camadas escondidas</i> -----	113
<i>Figura 4.16 – Os dois sentidos de fluxo de informação do algoritmo retro-propagação</i> -----	115
<i>Figura 4.17 – O fluxo de informação no neurónio da camada de saída j</i> -----	117
<i>Figura 4.18 – Fluxo de informação do neurónio da camada de saída k ligado a um neurónio j da camada escondida a ele ligado</i> -----	117
<i>Figura 4.19 – Mínimos locais e globais da função erro</i> -----	121
<i>Figura 5.1 – Esquema unifilar da rede de testes de 14 barramentos do IEEE</i> -----	129
<i>Figura 5.2 – Esquema unifilar da rede de testes de 57 barramentos do IEEE</i> -----	129
<i>Figura 5.3 – Perfis de tensão nos barramentos da rede de 14 barramentos (barramentos 1 a 8)</i> -----	131
<i>Figura 5.4 – Perfis de tensão nos barramentos da rede de 14 barramentos (barramentos Ref. e do 9 ao 14)</i> -----	132
<i>Figura 5.5 – Pontos característicos das curvas de tensão nos barramentos PV e barramento PQ (4, 5 e 7) da rede de 14 barramentos</i> -----	133
<i>Figura 5.6 – Pontos característicos das curvas de produção de energia reactiva dos barramentos PV da rede de 14 barramentos</i> -----	134
<i>Figura 5.7 – Perfis de tensão nos barramentos Ref. e PV da rede de 57 barramentos</i> -----	137
<i>Figura 5.8 – Perfis de tensão nos barramentos críticos da rede de 57 barramentos</i> -----	137

<i>Figura 5.9 – Pontos característicos dos perfis de tensão nos barramentos PV da rede de 57 barramentos</i>	138
<i>Figura 5.10 – Pontos característicos das curvas de produção de energia reactiva dos geradores dos barramentos PV da rede de 57 barramentos</i>	139
<i>Figura 5.11 – Curvas dos coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ dos barramentos PQ da rede de simulação de 14 barramentos</i>	142
<i>Figura 5.12 – Curvas dos coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ dos barramentos PV da rede de simulação de 14 barramentos</i>	142
<i>Figura 5.13 – Curvas dos seis coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ mais baixos referentes à rede de simulação de 57 barramentos</i>	144
<i>Figura 5.14 – Curva FSQV para a rede de 14 barramentos</i>	146
<i>Figura 5.15 – Curva FSQV para a rede de 57 barramentos</i>	148
<i>Figura 5.16 – Pontos característicos da curva FSQV para a rede de 57 barramentos</i>	148
<i>Figura 5.17 – Valores dos últimos 15 valores FSQV para a rede de 57 barramentos</i>	154
<i>Figura 5.18 – Curvas FSQV referentes aos cenários A1 a A11 (rede de simulação de 57 barramentos)</i>	156
<i>Figura 5.19 – Curvas FSQV dos cenários B1 a B11 convertidas para o menor número de pontos (136)</i>	158
<i>Figura 5.20 – Curvas FSQV referente aos cenários B1 a B11 para a rede de simulação de 57 barramentos (2ª abordagem)</i>	163
<i>Figura 5.21 – Erros de comparação da curva FSQV do cenário B1 com as curvas FSQV dos cenários B2 a B6 para a rede de 57 barramentos (2ª abordagem)</i>	164
<i>Figura 5.22 – Erros de comparação da curva FSQV do cenário B1 com as curvas FSQV dos cenários B7 a B11 para a rede de 57 barramentos (2ª abordagem)</i>	164
<i>Figura 5.23 – Erros de comparação da curva FSQV do cenário B1 com as curvas FSQV dos cenários B2 a B6 (2ª abordagem) para a rede de 57 barramentos entre os FC 280 e 355</i>	165
<i>Figura 5.24 – Erros de comparação da curva FSQV do cenário B1 com as curvas FSQV dos cenários B7 a B11 (2ª abordagem) para a rede de 57 barramentos entre os FC 280 e 355</i>	165
<i>Figura 5.25 – Erros dos valores FSQV finais para aumentos da carga base do barramento 2 da rede de 57 barramentos</i>	170
<i>Figura 5.26 – Erros dos valores FSQV finais para aumentos da carga base do barramento 2 e 3 da rede de 57 barramentos (incrementos de 1%)</i>	173
<i>Figura 5.27 – Aumentos máximos de carga base dos barramentos da rede de 57 barramentos para o erro dos valores FSQV finais máximo de 1% e para o incremento de 1%</i>	175

<i>Figura 5.28 – Aumentos máximos de carga base dos barramentos da rede de 57 barramentos para o erro dos valores FSQV finais máximo de 2% e para o incremento de 1% -----</i>	<i>176</i>
<i>Figura 5.29 – Curvas FSQV referentes à rede de 14 barramentos (sem contingência ou com contingência na linha 2 provocada no PC 1) -----</i>	<i>184</i>
<i>Figura 5.30 – Reduções dos PMC provocadas por contingências de linha de 1ª ordem na rede de testes de 14 barramentos -----</i>	<i>186</i>
<i>Figura 5.31 – Curvas FSQV correspondentes à simulação sem contingência e às 19 contingências provocadas no ponto de carga base (rede de testes de 14 barramentos) -----</i>	<i>187</i>
<i>Figura 5.32 – Curvas FSQV referente às 6 piores contingências de linhas/transformadores da rede de 14 barramentos -----</i>	<i>188</i>
<i>Figura 5.33 – As curvas FSQV referente às 6 contingências de linhas/transformadores menos penalizantes da rede de 14 barramentos -----</i>	<i>188</i>
<i>Figura 5.34 – Reduções dos PMC provocadas por contingências de linha de 1ª ordem na rede de testes de 57 barramentos -----</i>	<i>191</i>
<i>Figura 5.35 – As curvas FSQV referente às 6 piores contingências de linhas da rede de 57 barramentos do IEEE -----</i>	<i>191</i>
<i>Figura 5.36 – As curvas FSQV referente às 6 menos penalizantes contingências de linha/transformador da rede de 57 barramentos -----</i>	<i>192</i>
<i>Figura 5.37 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 2 provocada nos PC 1 e 1.1 (rede de 14 barramentos) -----</i>	<i>193</i>
<i>Figura 5.38 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 2 provocada nos PC 1 e 1.2 (rede de 14 barramentos) -----</i>	<i>193</i>
<i>Figura 5.39 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 2 provocada nos PC 1 e 1.3 (rede de 14 barramentos) -----</i>	<i>194</i>
<i>Figura 5.40 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 2 provocada nos PC 1 e 1.38 (rede de 14 barramentos) -----</i>	<i>194</i>
<i>Figura 5.41 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 2 provocada nos PC 1 e 1.385 (rede de 14 barramentos) -----</i>	<i>195</i>
<i>Figura 5.42 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 2 provocada nos PC 1 e 1.39 (rede de 14 barramentos) -----</i>	<i>195</i>
<i>Figura 5.43 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 2 provocada nos PC 1 e 1.6 (rede de simulação de 14 barramentos) -----</i>	<i>196</i>
<i>Figura 5.44 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 41 provocada nos PC 1 e 1.05 (rede de 57 barramentos) -----</i>	<i>197</i>

<i>Figura 5.45 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 41 provocada nos PC 1 e 1.2 (rede de 57 barramentos) -----</i>	<i>198</i>
<i>Figura 5.46 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 42 provocada nos PC 1 e 1.015 (rede de 57 barramentos) -----</i>	<i>198</i>
<i>Figura 5.47 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 42 provocada nos PC 1 e 1.04 (rede de 57 barramentos) -----</i>	<i>199</i>
<i>Figura 5.48 – Curvas FSQV referentes à rede de 14 barramentos (sem contingências, conting. LI 2, conting. LI 4, e conting. L2 e 4 em simultâneo) -----</i>	<i>200</i>
<i>Figura 5.49 – Curvas FSQV referentes à rede de 14 barramentos (sem contingências, conting. LI 3, conting. LI 8, e conting. L3 e 8 em simultâneo) -----</i>	<i>201</i>
<i>Figura 5.50 – Curvas FSQV referentes às contingências provocadas na rede de 14 barramentos: sem conting; contig. LI 2 (PC 1); contig. LI 4 (PC 1); contig. LI 2 (PC 1.1); e LI 4 (PC1.15) -----</i>	<i>203</i>
<i>Figura 5.51 – Curvas FSQV referentes às contingências provocadas na rede de 14 barramentos: sem conting; contig. LI 2 (PC 1); contig. LI 4 (PC 1); contig. LI 2 (PC 1.1); e LI 4 (PC1.2) -----</i>	<i>203</i>
<i>Figura 5.52 – Curvas FSQV referente às contingências provocadas na rede de 14 barramentos: sem contingências; contig. LI 3 (PC 1); contig. LI 8 (PC 1); contig. LI 3 (PC 1.2); e LI 8 (PC1.25) -----</i>	<i>204</i>
<i>Figura 5.53 – Curvas FSQV referente à rede de 14 barramentos: sem contingências; contig. LI 3 (PC 1); contig. LI 8; e contig. LI 8 (PC 1.2); e LI 3 (PC 1.4) -----</i>	<i>204</i>
<i>Figura 5.54 – Curvas FSQV referentes à rede de 14 barramentos (sem contingências ou com contingência no gerador 2 provocada no PC 1) -----</i>	<i>206</i>
<i>Figura 5.55 – Curvas FSQV referentes às contingências de gerador/shunt capacitivo da rede de 14 barramentos e provocadas no PC 1 -----</i>	<i>209</i>
<i>Figura 5.56 – Curvas FSQV referentes à rede de 57 barramentos (sem contingências ou com contingência no gerador 12 provocada no PC 1) -----</i>	<i>210</i>
<i>Figura 5.57 – Curvas FSQV referentes às simulações sem contingências ou com contingência de gerador provocada no PC1 (excepção do gerador 8) -----</i>	<i>214</i>
<i>Figura 5.58 – Curvas FSQV referentes às simulações sem contingências ou com contingência nos shunts capacitivos provocada no PC1 (rede de testes de 57 barramentos) --</i>	<i>215</i>
<i>Figura 5.59 – Curva FSQV sem contingência e com contingência no gerador 2 provocada nos PC 1 e 1.1 (rede de 14 barramentos) -----</i>	<i>216</i>
<i>Figura 5.60 – Curva FSQV sem contingência e com contingência no gerador 2 provocada nos PC 1 e 1.68 (rede de 14 barramentos) -----</i>	<i>216</i>

<i>Figura 5.61 – Curva FSQV sem contingência e com contingência no gerador 2 provocada nos PC 1 e 1.7 (rede de 14 barramentos) -----</i>	<i>217</i>
<i>Figura 5.62 – Curva FSQV sem contingência e com contingência do gerador 3 provocada nos PC 1 e 1.2 (rede de 57 barramentos) -----</i>	<i>218</i>
<i>Figura 5.63 – Curva FSQV sem contingência e com contingência do gerador 3 provocada nos PC 1 e 1.38 (rede de 57 barramentos) -----</i>	<i>218</i>
<i>Figura 5.64 – Curvas FSQV referente às contingências provocadas na de 14 barramentos: sem conting., conting. G2 PC 1, conting. G3 PC1, conting. em simultâneo G2 e G3 PC1 e conting. G2 (PC 1.2) e G3 (PC1.5) -----</i>	<i>220</i>
<i>Figura 5.65 – Curvas FSQV referente à rede de 57 barramentos: sem conting., conting. G3 PC 1, conting. G12 PC1, conting. em simultâneo G3 e G12 PC1 e conting. G12 (PC 1.1) e G3 (PC1.2) -----</i>	<i>221</i>
<i>Figura 5.66 – Curvas FSQV referente à rede de 57 barramentos com o limite de produção de energia reactiva do gerador 9 de 0,09 pu e 2 pu -----</i>	<i>224</i>
<i>Figura 5.67 – Curvas FSQV referente à rede de simulação de 57 barramentos com o limite de produção de energia reactiva do gerador 9 de 0,09 pu e 2 pu– Curva do novo índice NIVCP para a rede de 57 barramentos -----</i>	<i>226</i>
<i>Figura 6.1 – Curvas FSQV, cargas base (tracejado) e as restantes com as cargas base afectadas por um factor aleatório -----</i>	<i>235</i>
<i>Figura 6.2 – Valores dos factores aleatórios que afectam as cargas das simulações referentes à figura 6.1 -----</i>	<i>236</i>
<i>Figura 6.3 – Valores dos factores aleatórios que afectam as cargas das simulações multiplicadas por uma constante 2 -----</i>	<i>237</i>
<i>Figura 6.4 – Curvas FSQV, cargas base (tracejado) e as restantes com as cargas base afectadas por um factor aleatório e a constante 2 -----</i>	<i>238</i>
<i>Figura 6.5 – Valores dos factores aleatórios que afectam as cargas das simulações multiplicadas por uma constante 2,5 -----</i>	<i>238</i>
<i>Figura 6.6 – Curvas FSQV, cargas base (tracejado) e as restantes com as cargas base afectadas por um factor aleatório e a constante 2,5 -----</i>	<i>239</i>
<i>Figura 6.7 – Valores dos factores aleatórios que afectam as cargas das simulações multiplicadas por uma constante 2,8 -----</i>	<i>240</i>
<i>Figura 6.8 – Curvas FSQV, cargas base (tracejado) e as restantes com as cargas base afectadas por um factor aleatório e a constante 2,8 -----</i>	<i>240</i>
<i>Figura 6.9 – Curva da função de erro do treino da rede neuronal para o critério de paragem de 10^{-8} (rede com uma camada escondida com 10 neurónios) -----</i>	<i>242</i>

<i>Figura 6.10 – Erros percentuais de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de treino) e reais (rede com uma camada escondida com 10 neurónios e critério de paragem de 10^{-8})</i> -----	243
<i>Figura 6.11 – Erros percentuais de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de validação) e reais (rede com uma camada escondida com 10 neurónios e critério de paragem de 10^{-8})</i> -----	244
<i>Figura 6.12 – Curva da função de erro do treino da rede neuronal para o critério de paragem de 10^{-9} (rede com uma camada escondida com 10 neurónios)</i> -----	245
<i>Figura 6.13 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de treino) e reais (rede com uma camada escondida com 10 neurónios e critério de paragem de 10^{-9})</i> -----	245
<i>Figura 6.14 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de validação) e reais (rede com uma camada escondida com 10 neurónios e critério de paragem de 10^{-9})</i> -----	246
<i>Figura 6.15 – Curva do erro do treino da rede neuronal para o critério de paragem de 10^{-10} (rede com uma camada escondida com 10 neurónios)</i> -----	246
<i>Figura 6.16 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de treino) e reais (rede com uma camada escondida com 10 neurónios e critério de paragem de 10^{-10})</i> -----	247
<i>Figura 6.17 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de validação) e reais (rede com uma camada escondida com 10 neurónios e critério de paragem de 10^{-10})</i> -----	248
<i>Figura 6.18 – Curva do erro do treino da rede neuronal para o critério de paragem de 10^{-10} (rede com uma camada escondida com 20 neurónios)</i> -----	249
<i>Figura 6.19 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de treino) e reais (rede com uma camada escondida com 20 neurónios e critério de paragem de 10^{-10})</i> -----	250
<i>Figura 6.20 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de validação) e reais (rede com uma camada escondida com 20 neurónios e critério de paragem de 10^{-10})</i> -----	251
<i>Figura 6.21 – Curva do erro do treino da rede neuronal para o intervalo do critério de paragem de 10^{-10} a 10^{-11} (rede com uma camada escondida com 20 neurónios)</i> -----	252
<i>Figura 6.22 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de treino) e reais (rede com uma camada escondida com 20 neurónios e critério de paragem de 10^{-11})</i> -----	252

<i>Figura 6.23 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de validação) e reais (rede com uma camada escondida com 20 neurónios e critério de paragem de 10^{-11})</i>	253
<i>Figura 6.24 – Curva do erro do treino da rede neuronal para o critério de paragem de 10^{-10} (rede com uma camada escondida com 30 neurónios)</i>	254
<i>Figura 6.25 – Curva do erro do treino da rede neuronal para o critério de paragem de 10^{-11} (rede com uma camada escondida com 30 neurónios)</i>	255
<i>Figura 6.26 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de treino) e reais (rede com uma camada escondida com 30 neurónios e critério de paragem de 10^{-10})</i>	256
<i>Figura 6.27 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de treino) e reais (rede com uma camada escondida com 30 neurónios e critério de paragem de 10^{-11})</i>	256
<i>Figura 6.28 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de validação) e reais (rede com uma camada escondida com 30 neurónios e critério de paragem de 10^{-10})</i>	257
<i>Figura 6.29 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de validação) e reais (rede com uma camada escondida com 30 neurónios e critério de paragem de 10^{-11})</i>	257
<i>Figura 6.30 – Curva do erro do treino da rede neuronal para o critério de paragem de 10^{-11} (rede com uma camada escondida com 41 neurónios)</i>	259
<i>Figura 6.31 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de treino) e reais (rede com uma camada escondida com 41 neurónios e critério de paragem de 10^{-11})</i>	260
<i>Figura 6.32 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de validação) e reais (rede com uma camada escondida com 41 neurónios e critério de paragem de 10^{-11})</i>	260
<i>Figura 6.33 – Curvas da distância ao colapso em função da carga calculadas através de um FC contínuo e pela RNA</i>	263

ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 – Número de iterações dos FC, do FC contínuo, para a convergência da rede de simulação de 57 barramentos do IEEE -----</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 3.1 – Número de interrupções por classes de duração da rede de transporte portuguesa [REN03] -----</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 3.2 – Número de ocorrências na rede AT da EDP Distribuição [EDP04] -----</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 3.3 – Número de ocorrências na rede MT da EDP Distribuição [EDP04] -----</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 3.4 – Número de ocorrências na rede BT da EDP Distribuição [EDP04] -----</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 3.5 – Frequência das interrupções de energia eléctrica nas redes portuguesas nos períodos considerados -----</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 3.6 – Factores que se alteraram e que afectam a robustez do SEE americano -----</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 3.7 – Geradores indisponíveis no dia 14 de Agosto -----</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 3.8 – Comparação dos critérios de tensão (percentagem) -----</i>	<i>88</i>
<i>Tabela 4.1 – Funções de Activação -----</i>	<i>101</i>
<i>Tabela 5.1 – Tensões nos barramentos para vários PC (rede de 14 barramentos) -----</i>	<i>131</i>
<i>Tabela 5.2 – Limites de produção de energia reactiva dos geradores da rede de simulação de 14 barramentos -----</i>	<i>133</i>
<i>Tabela 5.3 – Tensões nos barramentos PV e as 10 piores tensões dos barramentos PQ no último PF (rede de testes de 57 barramentos) -----</i>	<i>136</i>
<i>Tabela 5.4 – Limites de produção de energia reactiva para a rede de testes 57 barramentos -</i>	<i>138</i>
<i>Tabela 5.5 – Coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ e tensões dos barramentos PQ referentes ao FC anterior ao colapso (rede de simulação de 14 barramentos) -----</i>	<i>143</i>
<i>Tabela 5.6 – Os seis coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ mais baixos e respectivas tensões referentes à rede de simulação de 57 barramentos -----</i>	<i>144</i>

<i>Tabela 5.7 – Coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ dos barramentos e valores da grandeza FSQV para a rede de 14 barramentos</i> -----	145
<i>Tabela 5.8 – Valores da grandeza FSQV para a rede de 57 barramentos</i> -----	147
<i>Tabela 5.9 – Cenários de cargas A1 a A9 para a rede de 14 barramentos</i> -----	150
<i>Tabela 5.10 – Quatro últimos valores FSQV para os cenários A1 a A9 para a rede de de 14 barramentos</i> -----	151
<i>Tabela 5.11 – Crescimento percentual das cargas para os cenários A1 a A9 para a rede de 14 barramentos</i> -----	151
<i>Tabela 5.12 – Cenários de cargas B1 a B11 para a rede de 57 barramentos</i> -----	153
<i>Tabela 5.13 – Quatro últimos FSQV para os cenários B1 a B11 (rede de simulação de 57 barramentos)</i> -----	154
<i>Tabela 5.14 – Características das curvas referentes aos cenários B1 a B11 (rede de simulação de 57 barramentos)</i> -----	157
<i>Tabela 5.15 – Cenários de cargas A1 a A9 para a rede de 14 barramentos (2º abordagem) ---</i>	160
<i>Tabela 5.16 – Quatro últimos valores FSQV para os cenários A1 a A9 para a rede de 14 barramentos (2º abordagem)</i> -----	160
<i>Tabela 5.17 – Cenários de cargas B1 a B11 para a rede de 57 barramentos (2º abordagem) --</i>	161
<i>Tabela 5.18 – Quatro últimos FSQV para os cenários B1 a B11 para a rede de 57 barramentos (2º abordagem)</i> -----	162
<i>Tabela 5.19 – Limites de produção de energia reactiva e tensões no momento do colapso nos barramentos PV e críticos para a rede de 57 barramentos e para os cenários B1 a B11 -----</i>	166
<i>Tabela 5.20 – Crescimentos de cargas das duas abordagens para a rede de 57 barramentos</i>	167
<i>Tabela 5.21 – Principais erros dos valores FSQV finais para os aumentos de carga do barramento 2 da rede de 57 barramentos</i> -----	170
<i>Tabela 5.22 – Principais erros dos valores FSQV finais para os aumentos de carga do barramento 2 e 3 da rede de 57 barramentos (incrementos de 1%)</i> -----	171
<i>Tabela 5.23 – Aumento das cargas base para um erro máximo de 1% no valor final do FSQV para a rede de simulação de 57 barramentos (incrementos de 1%)</i> -----	174
<i>Tabela 5.24 – Aumento das cargas base para um erro máximo de 2% no valor final do FSQV para a rede de simulação de 57 barramentos (incrementos de 1%)</i> -----	177

<i>Tabela 5.25 – Comparação do aumento de cargas base para um erro máximo de 1% e 2% no valor final do FSQV para a rede de 57 barramentos (incrementos de 1%) -----</i>	<i>178</i>
<i>Tabela 5.26 – Análise estatística dos limites de aumento das cargas base para um erro máximo de 1% no valor final do FSQV para a rede de 57 barramentos (incrementos de 1%) --</i>	<i>180</i>
<i>Tabela 5.27 – Comparação dos limites de aumento das cargas base para um erro máximo de 1% e 2 % no valor final do FSQV para a rede de 57 barramentos (incrementos de 1%) -----</i>	<i>181</i>
<i>Tabela 5.28 – Dados estatísticos dos quatro conjuntos de simulações de aumento de cargas nos barramentos da rede de 57 barramentos -----</i>	<i>182</i>
<i>Tabela 5.29 – Resultados da simulação de contingência de linha para a rede de 14 barramentos -----</i>	<i>185</i>
<i>Tabela 5.30 – Resultados considerados mais importantes da simulação de contingências de Linha para a rede de 57 -----</i>	<i>189</i>
<i>Tabela 5.31 – Impacto no PMC das contingências de 2º nível para a rede de 14 barramentos</i>	<i>201</i>
<i>Tabela 5.32 – Limites de produção de energia reactiva dos geradores da rede de 14 barramentos para a contingência do gerador do barramento 2 -----</i>	<i>206</i>
<i>Tabela 5.33 – Redução do PMC devido a contingência de gerador ou shunt capacitivo da rede de 14 barramentos -----</i>	<i>207</i>
<i>Tabela 5.34 – Limites de produção de energia reactiva dos geradores da rede de 14 barramentos para as contingências dos geradores/shunt capacitivo -----</i>	<i>208</i>
<i>Tabela 5.35 – PC onde ocorrem os limites de produção de energia reactiva dos geradores da rede de 57 barramentos para a contingência do gerador do barramento 12 -----</i>	<i>211</i>
<i>Tabela 5.36 – Reduções dos PMC devido às contingências de gerador/shunt capacitivo da rede de 57 barramentos -----</i>	<i>212</i>
<i>Tabela 5.37 – Produções de energia reactiva no primeiro FC com a contingência provocada no PC 1 no gerador do barramento 8 da rede de 57 barramentos -----</i>	<i>212</i>
<i>Tabela 5.38 – PC onde ocorrem os limites de produção de energia reactiva dos geradores da rede de 57 barramentos para as contingências de geradores (excepção geradores barramentos 8 e 12) -----</i>	<i>213</i>
<i>Tabela 5.39 – Redução do PMC devido à contingência de dois geradores da rede de 14 barramentos -----</i>	<i>220</i>

<i>Tabela 5.40 – Reduções dos PMC devido às contingências de gerador de 2º nível da rede de 57 barramentos -----</i>	<i>222</i>
<i>Tabela 5.41 – Limites de produção de energia reactiva para a rede de testes de 57 barramentos com a alteração do limite de produção de energia reactiva do gerador 9 -----</i>	<i>223</i>
<i>Tabela 5.42 – Aumento do PMC com a alteração do limite de produção de energia reactiva do gerador 9 da rede de testes de 57 barramentos -----</i>	<i>224</i>
<i>Tabela 6.1 – Resultados das três simulações efectuadas com a rede neuronal com 10 neurónios na única camada escondida -----</i>	<i>248</i>
<i>Tabela 6.2 – Resumo do melhor resultado com a rede neuronal com 10 neurónios e os referentes às duas simulações efectuadas com 20 neurónios na única camada escondida -----</i>	<i>253</i>
<i>Tabela 6.3 – Comparação dos resultados referentes às simulações realizadas com as RNA com 20 e 30 neurónios na única camada escondida -----</i>	<i>258</i>
<i>Tabela 6.4 – Comparação dos resultados referentes à simulação com a 4ª RNA com os melhores resultados das simulações com as outras RNA -----</i>	<i>261</i>

LISTA DE ACRÓNIMOS

FC – Fluxo de cargas

FCNR – Fluxo de Cargas pelo método Newton Raphson

FSQV – *Full Sum $\delta Q/\delta V$* , Soma Total da Derivada $\delta Q/\delta V$

PC – Ponto de carga

PCS - Perceptrão camada simples

PMC – Ponto máximo de carga

PMC – Perceptrão multicamada (RNA)

NIVCP – *New Index to Voltage Collapse Point*, Novo Índice ao Ponto de Colapso de Tensão

NR – Newton Raphson

RNA – Rede Neuronal Artificial

RP – Retro- propagação

SEE – Sistema Eléctrico de Energia

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações Gerais

Os Sistemas Eléctricos de Energia (SEE) tornaram-se no século XX os sistemas mais importantes no fornecimento de energia, graças às características muito próprias destes sistemas. As características especiais da energia eléctrica e a possibilidade de ser transportada à escala continental, através dos SEE, tem vindo a criar uma dependência crescente, atingindo actualmente níveis elevados. Todos os sectores económicos, com maior ou menor grau, centram as suas necessidades energéticas no consumo da energia eléctrica. Esta situação, caso haja um apagão parcial ou total do sistema, leva à paralisação da economia, nas zonas afectadas, com custos económicos e sociais muito altos.

A energia na sua forma eléctrica tem a vantagem de ser fácil o seu transporte e o seu controlo. Outra extraordinária característica deste tipo de energia é a possibilidade de se transformar com bastante facilidade nas outras formas de energia que o consumidor final necessita. Porém, a energia eléctrica não existe na natureza. A energia eléctrica é por isso uma forma de energia intermédia produzida por conversão de outros tipos de energia a que se chama energia primária.

Os SEE iniciam-se nas centrais produtoras de energia eléctrica, onde é realizada a conversão da energia primária em energia eléctrica. Dependendo da quantidade de energia a transportar e da distância a vencer, as características da energia eléctrica são modificadas através de transformadores, para que o seu transporte se faça da forma mais económica possível. Junto aos centros de consumo, as características da energia eléctrica são

sucessivamente modificadas para se adequarem às características do subsistema distribuidor e na parte final às características do escalão de baixa tensão.

Actualmente, os SEE são sistemas muito complexos, constituídos por centenas de centrais, linhas de transporte, subestações, etc. Nas redes de grande dimensão, estes sistemas chegam a atingir milhares de componentes. O funcionamento de cada componente é continuamente monitorizado por protecções próprias. Em caso de violação dos limites definidos a protecção retira de serviço esse componente, evitando a sua destruição, que poderia colocar em risco pessoas e bens. As consequências para o sistema eléctrico da saída de um componente dependerão da sua importância.

Contrariamente a outras formas de energia, a energia eléctrica não se pode armazenar, obrigando a que haja continuamente um equilíbrio entre a energia eléctrica produzida e consumida, numa situação normal de funcionamento dos SEE. Para que os sistemas eléctricos se mantenham estáveis, a frequência deverá permanecer num intervalo muito pequeno, 50 ± 0.05 ciclos por segundo no caso europeu. Como os consumos de energia eléctrica estão continuamente a variar, a sua produção também está continuamente a variar acompanhando os consumos. A capacidade de produção imediata, também chamada de reserva girante, é de grande importância dado a especificidade deste sistema. A reserva girante materializa-se em grupos produtores que estão sincronizados com a rede e por isso prontos a produzir energia eléctrica. A reserva de produção destes geradores é vital para fazer face a eventuais falhas de produção ou mesmo aumentos súbitos de consumo.

Outra das características dos SEE é manterem a tensão praticamente constante. A tensão poderá variar dentro do intervalo $\pm 5\%$ da tensão nominal. As tensões são mantidas dentro do intervalo especificado através da produção da energia reactiva. A produção de energia reactiva é também imprescindível para anular as quedas de tensão que se verificam ao longo da cadeia eléctrica. As cargas eléctricas além da energia activa, também consomem energia reactiva que o sistema tem que fornecer.

Os SEE, para além das naturais variações do consumo, que obrigam a um contínuo ajustamento da produção de energia eléctrica, também estão sujeitos a muitas situações de contingência que os fragilizam, tais como, saída de geradores, linhas e transformadores. É então necessário que o sistema seja seguro, mesmo em situações extremas e desfavoráveis para uma boa continuidade de alimentação das cargas.

Os SEE têm sistemas de protecções que deverão isolar os componentes defeituosos em tempo relativamente curto, para que após o isolamento do defeito o sistema se possa reajustar e continuar o fornecimento normal de energia eléctrica. Para que seja possível a aplicação deste princípio é necessário que os outros componentes possam colmatar a falta

de um componente, ou seja, por exemplo após uma saída de um gerador a reserva girante deverá substituir a produção perdida. O mesmo se deverá passar após a saída de uma linha de transporte, onde as outras linhas terão que ter capacidade de veicular a mesma energia até ao mesmo ponto de carga, ou após a perda de um transformador, os outros transformadores terão que ter capacidade de fornecer a mesma quantidade de energia. A estabilidade de um SEE está assim intimamente interligado ao grau de segurança definido para o mesmo sistema, porque na falta de reserva de produção, transporte ou mesmo transformação de energia eléctrica, o sistema entra numa situação de instabilidade. Caso não sejam efectuadas as manobras necessárias para anular a instabilidade, o SEE pode rapidamente evoluir para o colapso por tensão ou frequência provocando um apagão parcial ou total do sistema, com consequências económicas e sociais muito altas.

No ano de 2003 ocorreram dois apagões, *blackouts*, de grandes proporções. O primeiro, com uma perda de uma carga de cerca de 62 GW, por mais de 24 horas, incluiu a cidade de Nova Iorque e provocou o caos e a total paragem da economia das zonas afectadas. O segundo em Itália, de menor escala em relação ao primeiro, mas também com consequências económicas e sociais assinaláveis. Estes dois apagões levantaram novamente o problema da segurança dos SEE.

A liberalização do sector eléctrico em curso, está a possibilitar o aparecimento de produtores independentes e outras empresas distribuidoras de energia eléctrica. Estas mudanças estão a alterar o paradigma do sector eléctrico. No caso português, de um sector dominado por uma empresa, passa-se para um mercado em que várias empresas têm acesso aos subsistemas de produção e de distribuição de energia eléctrica. Se por um lado o mercado se tornou mais competitivo e o cliente final, em princípio, ganha com as mudanças, por outro lado os sistemas tendem a ser explorados muito perto dos seus limites técnicos, aparecendo por isso, com mais frequência e severidade, problemas de instabilidade de tensão.

A todas estas dificuldades, acresce ainda, a rejeição de certos grupos de opinião pública, por razões ambientais ou outras, de localizar novos centros produtores e de construir novas linhas de transporte, criando dificuldades acrescidas na expansão dos sistemas eléctricos e, consequentemente, fragilizando a sua segurança.

Todas estas dificuldades têm levado ao aproveitamento das capacidades do sistema eléctrico até pontos mais próximos dos limites do sistema, deixando de existir a margem de segurança que o sobredimensionamento permitia no passado.

Entre os vários tipos de problemas que podem existir nos sistemas eléctricos, destaca-se a instabilidade de tensão. A instabilidade de tensão, caso não sejam realizadas manobras para a anular, pode caminhar para a sua fase mais gravosa e extrema, o colapso de tensão.

Com a diminuição da margem de segurança e a maior probabilidade de ocorrer situações de instabilidade de tensão, torna-se imprescindível a monitorização do estado do sistema eléctrico de energia com a análise de índices de distância ao colapso de tensão [Kun94].

Nas últimas décadas muitos investigadores têm centrado a sua investigação [Kes86, Tir88, Lem90, Ajj92, Ajj92a, Lof92, Lof93 e Can96], no estudo dos fenómenos de instabilidade de tensão, determinando índices de distância ao colapso de tensão, através da quantificação da distância, do ponto de funcionamento actual, ao ponto de colapso de tensão. Este estudo tem também permitido determinar medidas de controlo preventivo das situações de instabilidade de tensão.

1.2 – Objectivo do trabalho

O objectivo do trabalho foi de analisar o problema da estabilidade de tensão num SEE, nomeadamente a da análise de índices de estabilidade de tensão e da distância ao ponto de colapso. No decorrer da investigação foi nomeadamente estudado um novo índice de estabilidade de tensão FSQV - *Full Sum $\delta Q/\delta V$* . Foram em particular estudadas as suas possíveis aplicações, na avaliação da estabilidade de tensão de sistemas eléctricos. Este trabalho teve as seguintes fases:

1. estudo da estabilidade de tensão, dos índices de estabilidade de tensão apresentados na literatura bem como dos processos que determinam a distância ao ponto de colapso;
2. estudo do índice de estabilidade de tensão FSQV; obtenção das curvas FSQV referentes às duas redes de teste utilizadas nas simulações; estudo das bases teóricas da grandeza FSQV;
3. caracterização das curvas FSQV obtidas para cada rede de testes, procurando encontrar semelhanças entre o andamento destas curvas e das curvas PV dos barramentos das redes de teste;
4. estudo da aplicabilidade das redes neuronais no cálculo da distância ao ponto de colapso;
5. análise do comportamento do último valor FSQV, antes do ponto de colapso, perante vários cenários de cargas, imprescindível para a definição de um novo índice ao colapso de tensão;

6. cálculo da variação máxima do aumento das cargas base, definindo um desvio máximo para a grandeza FSQV, numa primeira fase em um barramento e numa segunda fase em todas as combinações possíveis de dois barramentos;
7. análise da aplicabilidade do novo método FSQV no estudo de contingências de linhas, transformadores, geradores e baterias de condensadores, com a ocorrência de uma ou duas contingências;
8. análise da aplicabilidade do novo método FSQV no estudo de planeamento da expansão da produção de energia reactiva;
9. definição de um novo índice global de distância ao colapso NIVCP - *New Index to Voltage Collapse Point*, com base no novo método FSQV.

1.3 – Estrutura da dissertação

Este trabalho é constituído por 7 capítulos e 3 anexos.

Após esta introdução, apresentam-se no capítulo 2, os métodos de controlo de tensão dos sistemas eléctricos. Neste capítulo começa-se por analisar o gerador síncrono, por ter um papel central na manutenção dos níveis de tensão dentro dos intervalos definidos. Também são analisados outros equipamentos importantes para a compensação de redes eléctricas, como por exemplo as baterias de condensadores, os transformadores com regulação em carga, SVC, compensadores síncronos, entre outros. Seguidamente é realizada uma análise do comportamento das cargas eléctricas perante fenómenos de instabilidade de tensão. Perante uma instabilidade de tensão deverão ser realizadas acções correctivas para inverter esta situação, para que o sistema não caminhe para uma situação extrema, o colapso de tensão. As medidas de controlo preventivo do colapso de tensão são muito importantes e por isso analisadas. Os métodos de cálculo da distância ao colapso são muito importantes para a definição de índices ao ponto de colapso. São apresentadas as duas classes de índices que permitem a avaliação da segurança dos sistemas eléctricos relativamente ao fenómeno da instabilidade de tensão. A análise do método da continuação e da continuação predictor-correcto são importantes, por ter sido usada na investigação realizada uma variante a estes métodos. Na parte final deste capítulo são apresentadas as bases teóricas da grandeza FSQV.

No capítulo 3 é analisado o apagão ocorrido no dia 14 de Agosto de 2003, que afectou a parte este e nordeste dos Estados Unidos e a província de Ontário do Canadá. Este estudo

tem particular interesse, pois além de ter um impacto económico e social de grandes dimensões, na origem do apagão estiveram problemas de estabilidade de tensão provocados por incapacidade de produção de energia reactiva. A sua análise permite complementar o estudo teórico realizado no capítulo 2.

No capítulo 4 são analisadas as bases teóricas das redes neuronais. O seu estudo reveste-se de muito interesse, pois além de ser uma ferramenta muito actual, tem aplicabilidade em todas as áreas do conhecimento. A sua compreensão torna-se assim imprescindível para a posterior aplicação num caso concreto definido nesta dissertação. Pretende-se investigar se as redes neuronais constituem um método rápido de cálculo da distância ao colapso.

No capítulo 5 são apresentados os resultados numéricos das simulações realizadas para implementação dos algoritmos desenvolvidos. A apresentação dos resultados é acompanhada por uma análise crítica, fundamental na criação de dinâmica na investigação realizada. Estando a trilhar caminhos novos, torna-se imprescindível que constantemente se criem interrogações, se definam novas teses e novas direcções para a investigação.

No capítulo 6 apresentam-se os resultados numéricos da aplicação das redes neuronais a um caso concreto desenvolvido com base no método FSQV. As redes neuronais foram usadas como método rápido de cálculo da distância ao colapso, para ultrapassar o problema dos métodos tradicionais, os FC, serem muito demorados, caso as redes sejam de grandes dimensões. Foi feita uma comparação com os resultados obtidos pelos fluxos de cargas contínuos.

Finalmente, no capítulo 7, apresentam-se as conclusões do trabalho desenvolvido nesta dissertação e sugerem-se perspectivas de prosseguimento da investigação nesta área específica do conhecimento.

O trabalho é completado com os anexos A, B e C. No anexo A apresentam-se as duas redes de testes usadas para a realização das simulações. No anexo B apresenta-se o programa FCNR – **F**luxo de **C**argas pelo método **N**ewton **R**aphson, desenvolvido em Matlab, peça fundamental para o desenvolvimento de algoritmos para a realização de testes. No anexo C apresentam-se os resultados da investigação, que por serem muito extensos, não foram incluídos ou só foi realizada uma síntese, no capítulo 5, mas que se torna imprescindível a sua apresentação.

Capítulo 2

ESTABILIDADE DE TENSÃO

CAPÍTULO 2

ESTABILIDADE DE TENSÃO

2.1 – Introdução

Associado à evolução das sociedades modernas está o aumento progressivo do consumo de energia e em especial de energia eléctrica. Actualmente e por vários motivos a construção de infra-estruturas não tem acompanhado o aumento de cargas, alterando a situação de sobredimensionamento dos sistemas, que permitia a existência de uma margem de segurança elevada, para uma exploração muito perto dos seus limites. Esta alteração de estratégia tem provocado um avolumar de problemas na condução do sistema eléctrico com grande incidência na estabilidade de tensão.

A estabilidade de tensão é a capacidade que o SEE tem de manter os níveis de tensão dentro de intervalos aceitáveis, em todos os barramentos do sistema eléctrico, quer sob condições normais de exploração, quer após a ocorrência de uma contingência que perturbe o normal funcionamento do sistema [Kun94].

Nas redes eléctricas, ao longo do tempo, ocorrem aumentos de consumo de energia reactiva que as reservas de produção de energia reactiva devem colmatar. Desta forma é possível manter os níveis de tensão dentro dos valores adequados, em todo o sistema. Por outro lado, dado que os centros produtores se encontram normalmente distantes dos centros de consumo, o aumento de consumo implica um aumento de transporte de energia, originando maiores quedas de tensão nas linhas de transporte. Estas quedas deverão ser compensadas por aumentos de produção de energia reactiva, para manter as tensões dentro dos limites definidos. Nas situações em que o aumento de produção de energia reactiva não é possível, podem ocorrer fenómenos de instabilidade de tensão nos sistemas eléctricos.

A instabilidade de tensão é um comportamento anormal do sistema eléctrico, que se caracteriza por uma diminuição abrupta e incontável da tensão. Inicialmente, para grandes variações de carga, correspondem pequenas variações da tensão mas, a partir de um certo limite este comportamento altera-se, passando a existir grandes variações de tensão. Este fenómeno tem normalmente um carácter local. No entanto há situações em que as tensões descem a níveis muito baixos, o que incapacita o sistema de recuperar, encontrando-se então numa situação designada de colapso de tensão. O colapso de tensão é parcial caso só se verifique numa zona do sistema, ou total, provocando um apagão total das cargas, também designado por “*blackout*”, afectando todo o sistema.

Nas últimas décadas várias situações associadas à instabilidade de tensão deram origem a alguns colapsos de redes, como por exemplo:

- 1970 Japão – durante 30 minutos;
- 1970 USA – durante horas no estado de Nova Iorque;
- 1978 França – durante 26 minutos;
- 1987 Japão – durante horas;
- 2003 EUA/Canadá.

O mais recente apagão ocorreu no dia 14 de Agosto de 2003. Afectou a parte este e nordeste dos Estados Unidos e a província de Ontário do Canadá, com uma população estimada em 50 milhões de pessoas e uma carga eléctrica de 61,8 MW. A sua dimensão, impacto social e a necessidade de se complementar o estudo teórico com a análise de um caso prático, sugeriram que se considere este apagão como um “caso de estudo”. Outro factor que motivou fortemente o seu estudo foi a existência de um pré-colapso de tensão, que se verificou antes do apagão, devido à incapacidade de produção energia reactiva. Este caso de estudo será apresentado no capítulo 3.

2.2 – Métodos de controlo da tensão

A instabilidade de tensão pode ocorrer devido à ocorrência de uma contingência, como por exemplo a saída de serviço de um gerador ou de uma linha, originando uma redução de produção de energia reactiva. Esta situação pode ser ainda mais grave, se coincidir com a incapacidade de vários geradores aumentarem a sua produção de energia reactiva, por estarem no seu limite de produção. Outra situação que pode provocar instabilidade de tensão é o aumento de cargas anormal. Actualmente são mais frequentes vagas de calor ou frio, que provocam consumos acima das capacidades dos sistemas eléctricos.

No estudo da instabilidade de tensão é importante a análise do comportamento e da contribuição dos vários componentes, que permitem realizar o controlo da tensão. Para cada um dos equipamentos será efectuada uma análise do seu comportamento em regime estacionário, regime em que foi efectuada este trabalho, não se deixando de realizar, também, e caso seja importante, uma análise em regime dinâmico.

2.2.1 – Geradores Síncronos

Os geradores de grande potência são síncronos, ficando limitado para as pequenas produções de energia os geradores assíncronos, devido às suas limitações técnicas de entrada em rede. Os geradores síncronos são os que mais contribuem com a produção de energia eléctrica para os SEE. A sua potência unitária poderá ir até várias centenas de MVA estando unicamente limitados por restrições construtivas. Estes geradores, por conversão de energia primária, produzem energia activa, mas ao estarem dotados de sistemas de excitação no rotor, têm também a capacidade de produzir energia reactiva.

A sua contribuição para a estabilidade de tensão nos sistemas eléctricos é fundamental, sendo os principais responsáveis pela manutenção das tensões dentro dos limites definidos, por variação da produção da energia reactiva. Em certas situações pontuais caracterizadas por níveis de tensões altos, são subexcitados, passando a consumir energia reactiva. Os geradores constituem assim a principal reserva de produção de energia reactiva e os principais garantes da estabilidade de tensão nos sistemas eléctricos.

Pelas razões apontadas, o estudo pormenorizado dos geradores síncronos é fundamental pela importância que têm nos sistemas de energia. Na análise de estabilidade de tensão dos sistemas eléctricos é imprescindível o conhecimento das características e dos limites técnicos dos geradores.

2.2.1.1 - Modelo Matemático

Na referência [Kun94] podemos encontrar um modelo matemático, em pu, que descreve completamente as performances eléctricas da máquina síncrona.

Equações de tensão do estator

$$e_d = p \Psi_d - \Psi_q \omega_r - R_a i_d \quad (2.1)$$

$$e_q = p \Psi_q - \Psi_d \omega_r - R_a i_q \quad (2.2)$$

$$e_0 = p \Psi_0 - R_a i_0 \quad (2.3)$$

Equações de tensão do rotor

$$e_{fd} = p \Psi_{fd} + R_{fd} i_{fd} \quad (2.4)$$

$$0 = p \Psi_{1d} + R_{1d} i_{1d} \quad (2.5)$$

$$0 = p \Psi_{1q} + R_{1q} i_{1q} \quad (2.6)$$

$$0 = p \Psi_{2q} + R_{2q} i_{2q} \quad (2.7)$$

Equações do fluxo ligado do estator

$$\Psi_d = -(L_{ad} + L_l) i_d + L_{ad} i_{fd} + L_{ad} i_{1d} \quad (2.8)$$

$$\Psi_q = -(L_{aq} + L_l) i_q + L_{aq} i_{1d} + L_{aq} i_{2q} \quad (2.9)$$

$$\Psi_0 = -L_0 i_0 \quad (2.10)$$

Equações do fluxo ligado do rotor

$$\Psi_{fd} = L_{ffd} i_{fd} + L_{fld} i_{1d} + L_{ad} i_d \quad (2.11)$$

$$\Psi_{1d} = L_{ffd} i_{fd} + L_{11d} i_{1d} + L_{ad} i_d \quad (2.12)$$

$$\Psi_{1q} = L_{11q} i_{1q} + L_{aq} i_{2q} - L_{aq} i_q \quad (2.13)$$

$$\Psi_{2q} = L_{aq} i_{1q} + L_{22q} i_{2q} - L_{aq} i_q \quad (2.14)$$

Equação do binário no entre-ferro

$$T_e = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d \quad (2.15)$$

onde:

e_d, e_q, e_0 – tensões instantâneas do estator referidas aos componentes $dq0$

$i_d, i_q, e i_0$ – correntes instantâneas do estator referidas aos componentes $dq0$

p – operador diferencial d/dt

Ψ_d, Ψ_q e Ψ_0 – fluxos do estator referidos aos componentes $dq0$

ω_r – pulsação da tensão

R_a – Resistência de uma fase do estator

e_{fd} – tensão do rotor

Ψ_{fd} – fluxo no rotor

$\Psi_{1d}, \Psi_{1q}, \Psi_{2q}$ - fluxos do rotor referidos aos componentes $dq0$

R_{fd} - resistência do rotor

R_{1d}, R_{1q}, R_{2q} - resistência do rotor referidos aos componentes $dq0$

Com a finalidade de simplificar o modelo matemático, para ser possível a sua aplicação a grandes sistemas de energia e reduzir o esforço de calculo, são desprezados os transitórios do estator (termos $p \Psi_d$ e $p \Psi_q$) das equações (2.1) e (2.2), passando a só ter componentes à frequência fundamental. Também é desprezável o efeito da variação da velocidade na tensão do estator. A primeira simplificação é justificada pelo rápido abaixamento dos transitórios do estator, não se justificando a sua modelização. A segunda simplificação é baseada no facto de as variações da velocidade serem pequenas e não terem importância significativa na tensão, podendo-se por essa razão considerar $\omega_r = 1,0$ pu. Aplicando as duas simplificações às equações (2.1) e (2.2), ficaram:

$$e_d = -\Psi_q - R_a i_d \quad (2.16)$$

$$e_q = -\Psi_d - R_a i_q \quad (2.17)$$

As restantes equações, 2.3 até 2.15, mantêm-se sem alteração.

2.2.1.2 - Limites de capacidade de produção de energia reactiva

Sendo os geradores síncronos os principais produtores de energia reactiva, a análise dos limites da capacidade da sua produção é de extrema importância para o estudo da estabilidade de tensão nos SEE. Existem três factores que limitam a produção de energia reactiva:

- o limite da intensidade de corrente no estator;
- o limite da intensidade de corrente de excitação;
- a região limite térmica do gerador com o gerador subexcitado.

Se os dois primeiros limites estão directamente relacionados com as secções das bobinagens do estator e rotor, e por isso continuamente vigiadas por protecções que não deixam exceder além de uma tolerância previamente definida, o terceiro limite relaciona-se com o aquecimento localizado, devido às correntes de fugas, como irá ser analisado posteriormente. A energia de perdas, que se transforma em calor, é continuamente retirada da máquina por sistemas de arrefecimento que a mesma possui. As três limitações impostas têm a finalidade de proteger o gerador de situações limites, evitando a sua destruição.

O limite da intensidade de corrente do estator

O limite da intensidade de corrente do estator está relacionado com o limite de temperatura, que os seus enrolamentos, suportam em trabalho contínuo. Os enrolamentos do estator de resistência R ao serem atravessados por uma intensidade de corrente I têm perdas de energia por efeito de joule, definidas pela expressão $R I^2$. Esta energia de perda transforma-se em calor, provocando uma subida da temperatura dos enrolamentos. Este calor é retirado pelos sistemas de arrefecimento dos geradores, mas há a necessidade de definir uma intensidade de corrente máxima, como protecção do alternador, para não exceder os limites de aquecimento.

Directamente relacionada com a intensidade de corrente está a sua potência aparente S , que é definida pela expressão:

$$S = P + jQ = |E_t| |I_t| (\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (2.18)$$

Na figura 2.1 apresenta-se o diagrama PQ de um gerador síncrono com a zona limite térmico da corrente do estator definida.

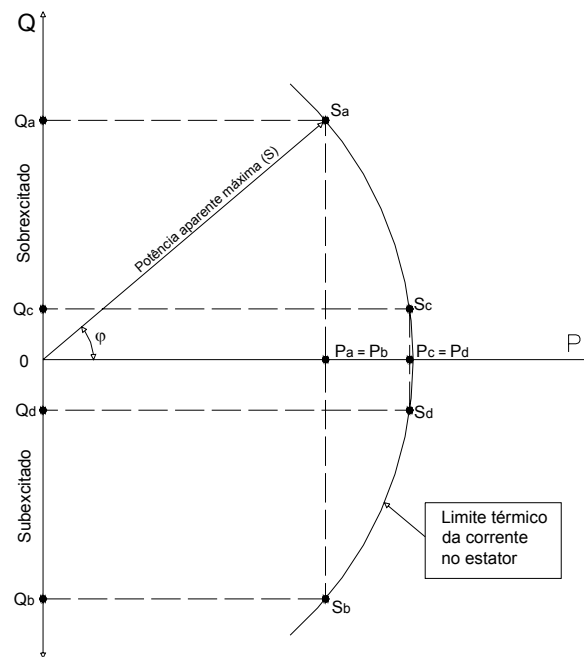


Figura 2.1 – Diagrama PQ de um gerador síncrono com o limite térmico da corrente do estator definido

O limite térmico do funcionamento do estator corresponde a um círculo com centro em zero e com raio correspondente à potência aparente máxima S , calculada pela expressão 2.18. Este arco define o limite de uma área dos pontos de funcionamento possíveis do gerador, na zona central. A definição dos limites superior e inferior será objecto de análise a realizar mais à frente nesta secção.

Dependendo das necessidades de produção de energia activa e reactiva, é possível definir o ponto de funcionamento do gerador. Como exemplo, na figura 2.1, estão representados quatro pontos de funcionamento. O ponto de funcionamento A, corresponde a um ponto de funcionamento limite com o gerador a produzir a potência aparente S_a , potência activa P_a e potência reactiva Q_a . Neste ponto de funcionamento a máquina está sobreexcitada o que significa que está a produzir energia reactiva. A potência activa e reactiva produzidas são iguais, o que corresponde a um factor de potência e 0,707.

No ponto de funcionamento C, a potência activa P_c é superior à potência activa P_a , o que implica que a potência reactiva produzida Q_c tenha que ser inferior à potência reactiva Q_a , já que S_a tem que ser igual a S_c .

Os pontos de funcionamento B e D correspondem a pontos de funcionamento em que o gerador está subexcitado. Nesta situação, o gerador está a absorver energia reactiva da rede e a produzir energia activa. Tudo se passa da mesma forma em relação aos dois primeiros pontos de funcionamento analisados. Os pontos de funcionamento referentes a este quadrante, no período correspondente a horas cheias ou ponta, normalmente não são utilizados já que há sempre a necessidade de produzir energia reactiva. Nas horas de vazio poderá haver a necessidade de absorver energia reactiva da rede, para baixar os níveis de tensão.

O limite da intensidade de corrente do rotor

A segunda limitação, relaciona-se com o limite da intensidade de corrente de excitação. Esta limitação está intimamente ligada ao limite de temperatura que os enrolamentos rotóricos suportam em trabalho contínuo. Os enrolamentos do rotor, de resistência R_{fd} , ao serem atravessados por uma intensidade de corrente I_{fd} , têm perdas de energia por efeito de joule, de acordo com a expressão $R_{fd}I_{fd}^2$. O calor é retirado pelo sistema de arrefecimento, mas há a necessidade de definir uma intensidade máxima de excitação para proteger o gerador.

Na figura 2.2 apresenta-se o diagrama PQ de um gerador síncrono, tendo agora também definido o limite térmico da intensidade de corrente de excitação.

Este segundo limite térmico corresponde a um círculo com centro no ponto D calculado pela expressão:

$$D = \frac{E_t^2}{X_s} \quad (2.19)$$

D é a relação entre as potências activa e reactiva da corrente de excitação. Este ponto localiza-se no eixo negativo de energia reactiva. O raio é dado pela expressão:

$$R = \frac{X_{ad}}{X_s} E_t i_{fd} \quad (2.20)$$

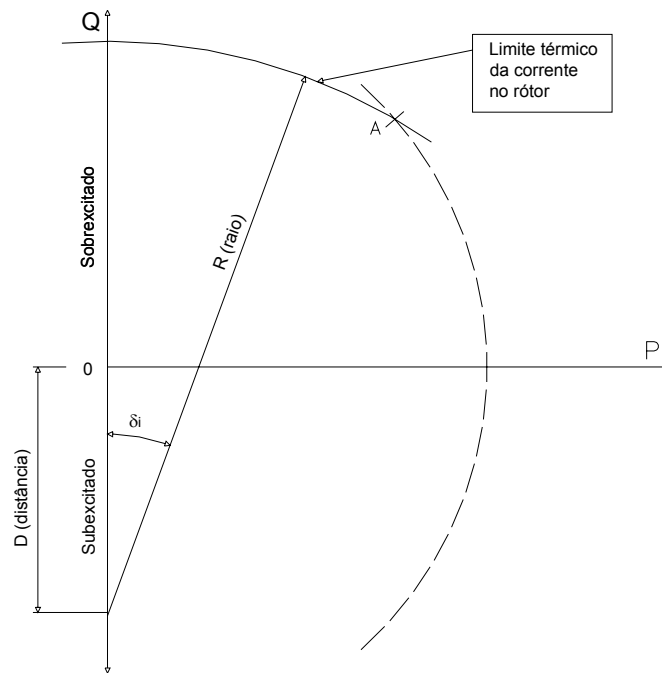


Figura 2.2 – Diagrama PQ de um gerador síncrono com o limite térmico da intensidade de corrente do rotor definido

O ponto A, da figura 2.2, corresponde ao ponto de funcionamento limite para a potência aparente máxima. A partir deste ponto, para ser possível aumentar a produção de energia reactiva, é necessário diminuir a produção de energia activa, num valor superior ao necessário para manter S constante.

A região limite de aquecimento com o gerador subexcitado

A terceira limitação refere-se ao limite do gerador a funcionar subexcitado. O fluxo ao entrar na direcção perpendicular às placas do circuito magnético do estator causa correntes parasitas, que por sua vez vão provocar um aquecimento localizado no extremo das bobinas. Esta situação é crítica quando o gerador está subexcitado, provocando limitações de funcionamento neste quadrante. Na figura 2.3 apresenta-se o diagrama PQ de um gerador síncrono com a região de limite térmico com o gerador subexcitado definido.

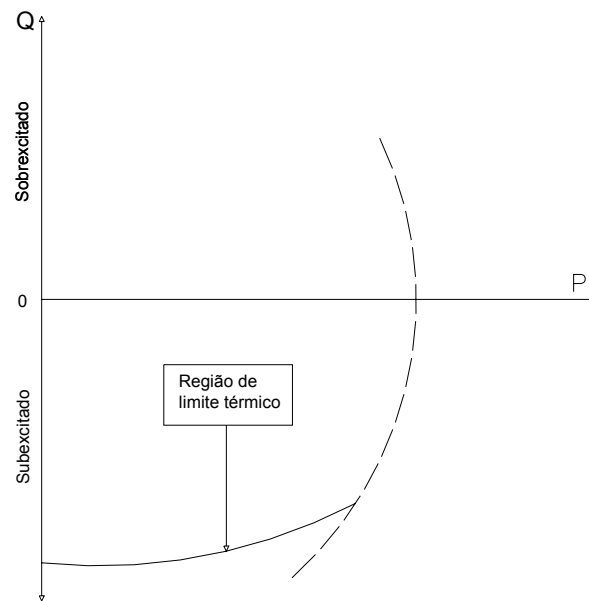


Figura 2.3 – Diagrama PQ de um gerador síncrono com a região do limite térmico com o gerador subexcitado definido

A importância dos sistemas de arrefecimento

Os limites de capacidade de produção de energia dos geradores síncronos dependem da capacidade de refrigeração do seu sistema de arrefecimento. Os geradores normalmente utilizam o ar, como meio para retirar o excesso de calor, produzido no seu funcionamento normal. Os sistemas de arrefecimento mais eficientes utilizam outros fluidos, em pressão, para baixar a temperatura do gerador e possibilitar o aumento de capacidade de produção de energia. Como exemplo, apresenta-se na figura 2.4 as curvas correspondentes à capacidade limite de produção de energia, de um gerador de 400 MVA. Este gerador utiliza o hidrogénio em vez de ar, como meio de refrigeração. O aumento da pressão do hidrogénio de 15 PSI para o dobro, 30 PSI, ou triplo 45 PSI, faz aumentar a capacidade de produção de energia aparente, activa e/ou reactiva dependendo do ponto de funcionamento.

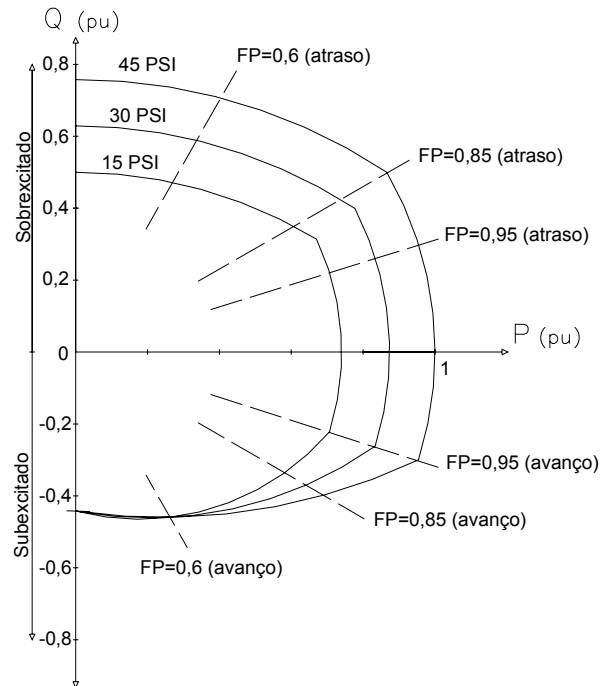


Figura 2.4 – Diagramas PQ de um gerador síncrono com arrefecimento a hidrogénio

2.2.1.3 - Os diagramas QV

O comportamento de um gerador síncrono perante a instabilidade de tensão também se poderá realizar pela análise dos seus diagramas QV. Os diagramas QV são elaborados a partir de um conjunto de diagramas PQ, calculados para diferentes níveis de tensão da rede e sempre para a mesma potência activa produzida que se considera constante [Cig92]. Na figura 2.5 apresenta-se o diagrama QV de um gerador síncrono. Como se pode ver na mesma figura, perante uma situação de instabilidade de tensão, a potência activa produzida mantém-se praticamente constante, enquanto que a potência reactiva e a tensão variam. Se a tensão na rede diminuir progressivamente, a corrente de excitação vai aumentar até atingir o seu limite. A partir que é alcançado este limite, que é praticamente vertical, o gerador não poderá manter a tensão nos seus terminais, tendo mesmo de diminuir ligeiramente a potência reactiva produzida. Caso o limite de corrente do estator seja atingido, a situação agrava-se rapidamente devido ao tipo de curva deste limite. Uma pequena descida da tensão irá provocar uma grande diminuição de produção de potência reactiva caminhando-se rapidamente para uma situação de colapso.

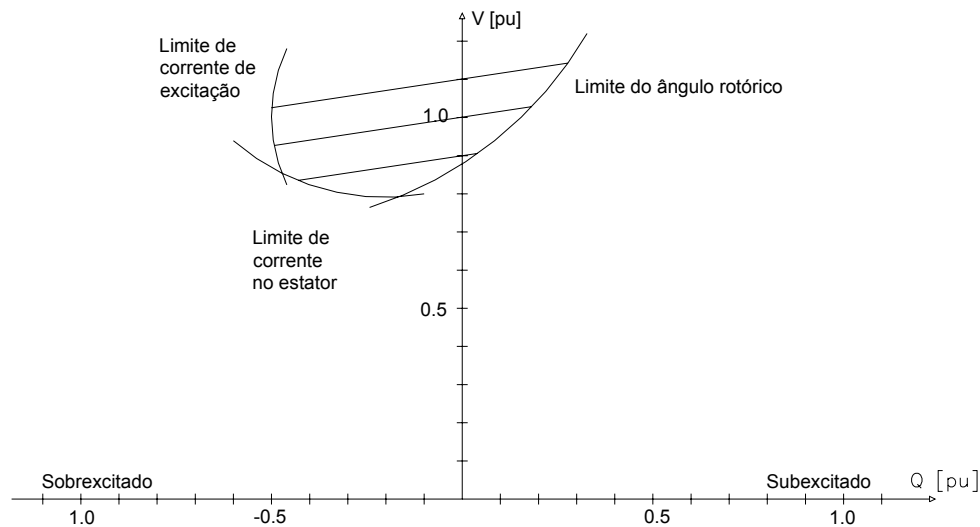


Figura 2.5 – Diagrama QV de um gerador síncrono

2.2.1.4 - Os AVR

A regulação da tensão no gerador é efectuada pelo Regulador Automático de Tensão, *AVR - Automatic Voltage Regulator*. Este regulador regula automaticamente a tensão nos terminais do gerador. Caso a tensão nos terminais do gerador desça abaixo de um valor pré-definido, automaticamente é incrementada a produção de energia reactiva, por actuação na excitação do gerador, levando novamente a tensão para o valor de referência.

Os sistemas de regulação mais antigos passam a máquina para modo manual logo que o limite de corrente de excitação é atingido. Isto significa que a máquina, a partir desse momento, fica a funcionar com uma excitação constante e igual ao seu valor máximo. A partir deste momento o gerador deixa de poder regular a tensão, passando a comportar-se como um barramento PQ.

Os reguladores de tensão mais recentes, incorporam já os limitadores de excitação, sub-excitação e de intensidade máxima do estator. Também, têm a possibilidade de realizar a compensação da impedância do transformador elevador, que está sempre associado a um gerador, dado que a tensão de produção normalmente é inferior à tensão da rede onde irá injectar a energia eléctrica produzida.

Na figura 2.6 apresenta-se um diagrama de blocos de um AVR [Kun94]. Com a possibilidade de ajustar a resistência R_c e a reactância X_c , é possível simular a impedância entre os

terminais do gerador e o ponto em que se pretende que a tensão seja efectivamente controlada.

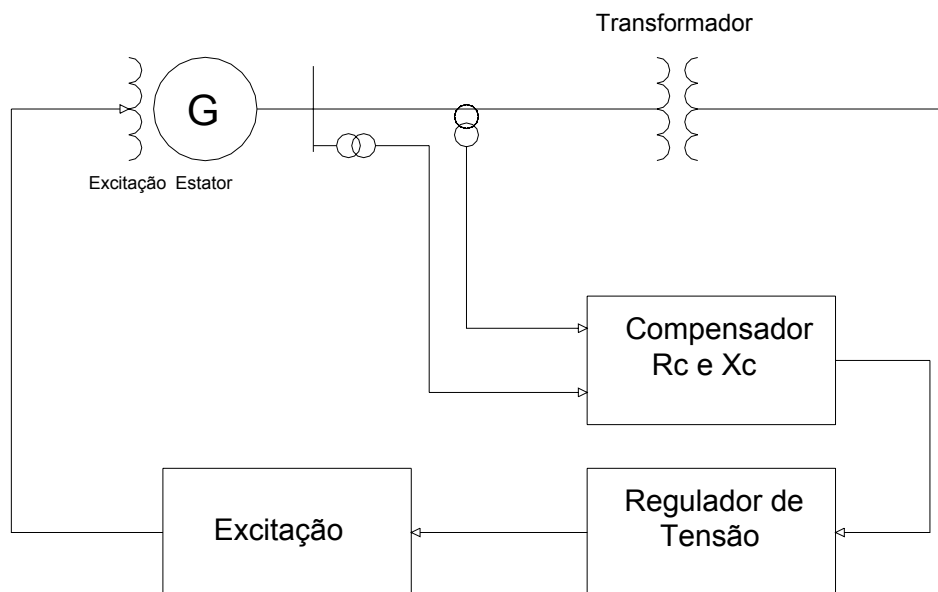


Figura 2.6 – Diagrama de blocos de um AVR

Os limitadores de excitação, *OXL – Overexcitation limiter*, permitem proteger o gerador de sobre aquecimento devido a uma prolongada e excessiva corrente de excitação. Este limitador também é conhecido por *MXL – Maximum excitation limiter*. Este limite foi analisado na secção 2.2.1.2. e está representado na figura 2.2.

Os limitadores de subexcitação, *UEL – underexcitation limiter*, permitem proteger o gerador de sobre aquecimento devido a um aquecimento localizado no estator, provocado correntes parasitas. Este limite foi analisado na secção 2.2.1.2. e está representado na figura 2.3.

2.2.2 – Baterias de condensadores

A rede de transporte de energia tem uma natureza predominantemente indutiva. A ligação de baterias de condensadores, em série ou paralelo, é uma das formas que habitualmente é usada para realizar a sua compensação, mantendo os níveis de tensão dentro dos valores desejados. Desta maneira é possível reduzir a intensidade de corrente que transita nas linhas por injeção de energia reactiva capacitiva. As subestações MAT/AT ou MAT/MT,

normalmente têm uma ou várias baterias de condensadores para produzirem localmente parte da energia reactiva que as cargas solicitam.

As baterias de condensadores em paralelo também são os equipamentos habitualmente usados para realizar a correcção do factor de potência junto aos consumos BT ou MT. Nas linhas MT longas, permitem subir o perfil de tensão, a partir do ponto onde são ligadas, evitando investimentos em zonas que normalmente a baixa densidade de cargas os torna inviáveis.

A compensação paralela de linhas de transporte é realizada com a colocação de baterias de condensadores em paralelo com as linhas. Assim, é possível diminuir a perdas XI^2 das linhas, permitindo aumentar os níveis de tensão. Um aumento de carga provoca um aumento da corrente de linha e, conseqüentemente, um abaixamento da tensão. Como os condensadores estão em paralelo, um aumento da corrente na linha provoca uma diminuição da produção de energia reactiva, visto que a produção de energia reactiva pelo condensador em paralelo é directamente proporcional ao quadrado da tensão. A ligação de mais baterias de condensadores permitirá manter os níveis de tensão nos valores desejados.

Na figura 2.7 apresentam-se curvas PV para diferentes valores de compensação com baterias de condensadores em paralelo. A entrada de mais uma bateria de condensadores corresponde a uma nova curva PV, que corresponde a uma nova subida da tensão e que permite um aumento da carga do sistema. Porém, a subida de tensão deverá ser dentro dos limites impostos, $\pm 5\%$ da tensão nominal, o que limita a potência da bateria de condensadores a entrar em serviço. Com o aproximar da zona extrema da curva, verifica-se uma menor capacidade de aumentar a carga, dado que a curva tem uma inclinação maior e a tensão rapidamente se aproxima do limite inferior, -5% da tensão nominal.

Na figura 2.8 apresenta-se a compensação paralela de uma linha de transmissão com ligação dos condensadores: com três níveis de compensação através de um terciário de um transformador (a) ou com ligação directa (b).

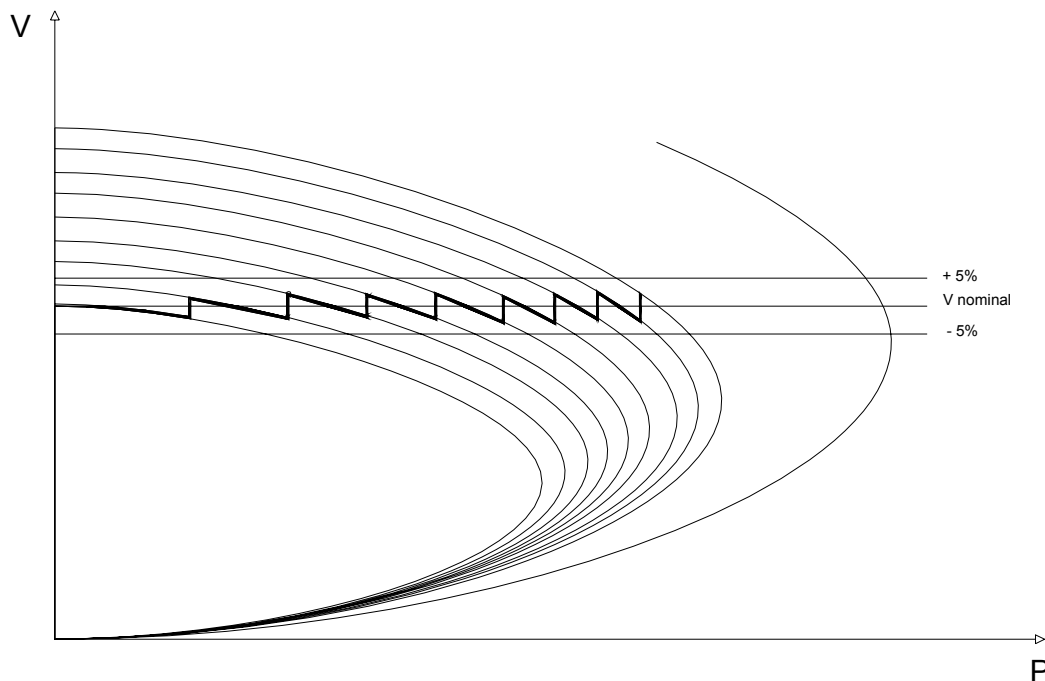


Figura 2.7 – Curvas PV para diferentes valores de compensação com baterias de condensadores em paralelo

A compensação série de linhas de transporte longas é realizada com a colocação de baterias de condensadores em série nas linhas. Assim, é possível diminuir a impedância da linha, aumentando a capacidade de transporte de energia. Um aumento de carga provoca um aumento da corrente de linha e, conseqüentemente, um abaixamento da tensão. Como os condensadores estão em série, um aumento da corrente na linha provoca um aumento de produção de energia reactiva, visto que a produção de energia reactiva pelo condensador é proporcional a I^2 . Este aumento de produção de energia reactiva na linha provoca um aumento da tensão. Há assim uma maior produção de energia reactiva quando efectivamente é necessário para subir a tensão da linha. Pode-se então concluir que a compensação série tem um efeito auto-regulador da tensão da linha.

A compensação série ideal deverá ser 100 %, anulando completamente a reactância da linha. No entanto, esta compensação ideal acarreta vários tipos de problemas, como por exemplo ressonâncias à frequência fundamental e o aumento da complexidade das protecções. Como valor máximo de compensação série é normalmente adoptado o valor de 80 % da reactância da linha [Kun94].

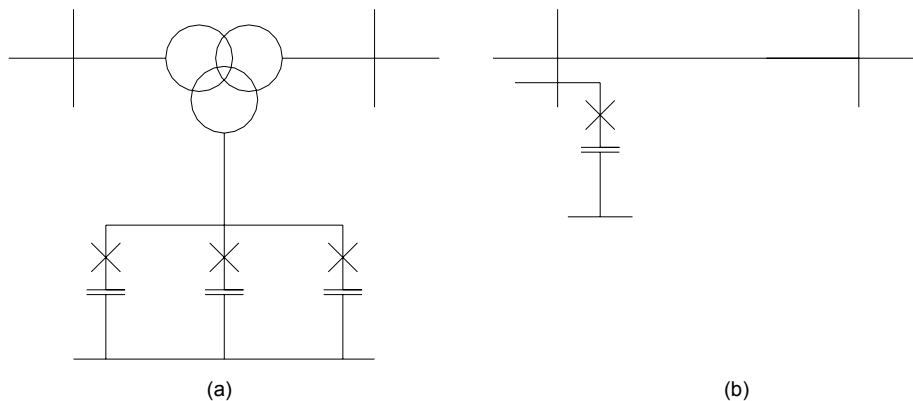


Figura 2.8 – Compensação paralela com ligação das baterias de condensadores através de um terciário (a) ou directamente (b)

2.2.3 – Transformadores com tomadas de regulação em carga

A utilização de transformadores com tomadas de regulação, *LTC – Load Tap Changers*, permite regular as tensões nos barramentos, sendo por isso um importante meio para manter a estabilidade da tensão nos sistemas eléctricos. Habitualmente todos os transformadores das subestações da rede de transporte, para ligação dos patamares MAT/MAT ou MAT/AT, são deste tipo. Também nas subestações AT/MT, este tipo de transformador é imprescindível com o mesmo propósito. Nas figuras 2.9 e 2.10 apresentam-se os esquemas unifilares de transformadores em carga, respectivamente de uma subestação MAT/MAT e MAT/AT.

Com a entrada em laboração das indústrias, no início da manhã, a carga aumenta provocando maiores quedas de tensão e o consequente abaixamento da tensão nos barramentos das subestações. A tensão no barramento automaticamente é reposta para o valor de referência por adequação da tomada do transformador. A mesma situação acontece, agora com um sentido inverso, quando a carga diminui ao fim do dia, devido à paragem laboral das indústrias, havendo a necessidade de baixar a tensão do barramento.

Actualmente é normal que o transformador com regulação em carga tenha um controlo do tipo tempo inverso, em vez de tempo constante, permitindo uma rápida regulação da tensão de acordo com tipo de descida da tensão. Isto significa que quanto mais rápida for a descida da tensão mais rapidamente a tensão será regulada para o valor definido de regulação.

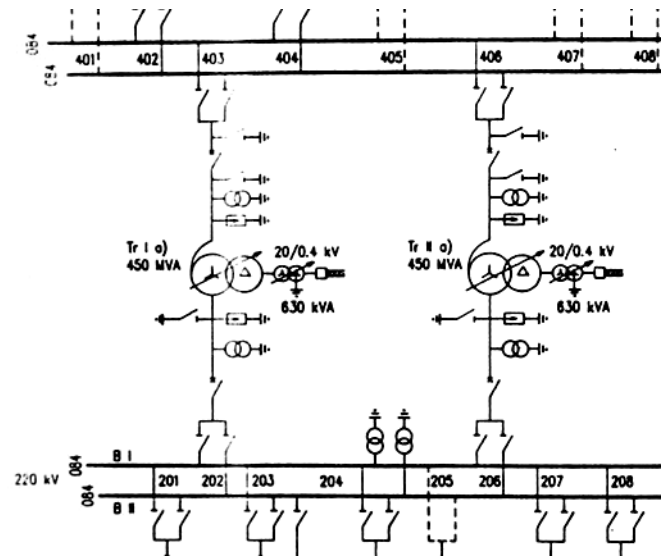


Figura 2.9 – Esquema unifilar de dois transformadores MAT/MAT com regulação em carga (esquema parcial de uma subestação)

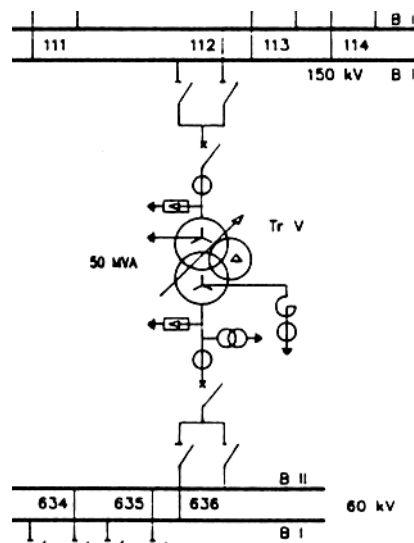


Figura 2.10 – Esquema unifilar de um transformador MAT/AT com regulação em carga (esquema parcial de uma subestação)

2.2.4 – Static Var Compensators

Os *Static Var Compensators* – SVC, apresentam vantagens relativamente às técnicas da compensação paralelas clássicas. As suas vantagens são o tempo de actuação mais curto e de se conseguir que a tensão se mantenha num perfil quase constante, como é mostrado na figura 2.11 [Fer99].

Existem vários tipos de SVC, sendo frequente na prática a combinação de vários tipos. Na figura 2.12 apresenta-se, como exemplo, um SVC constituído por um *TCR* – *Thyristor-controlled reactor* e três *TSC* – *Thyristor-switched capacitor* e um filtro de harmónicos [Kun94].

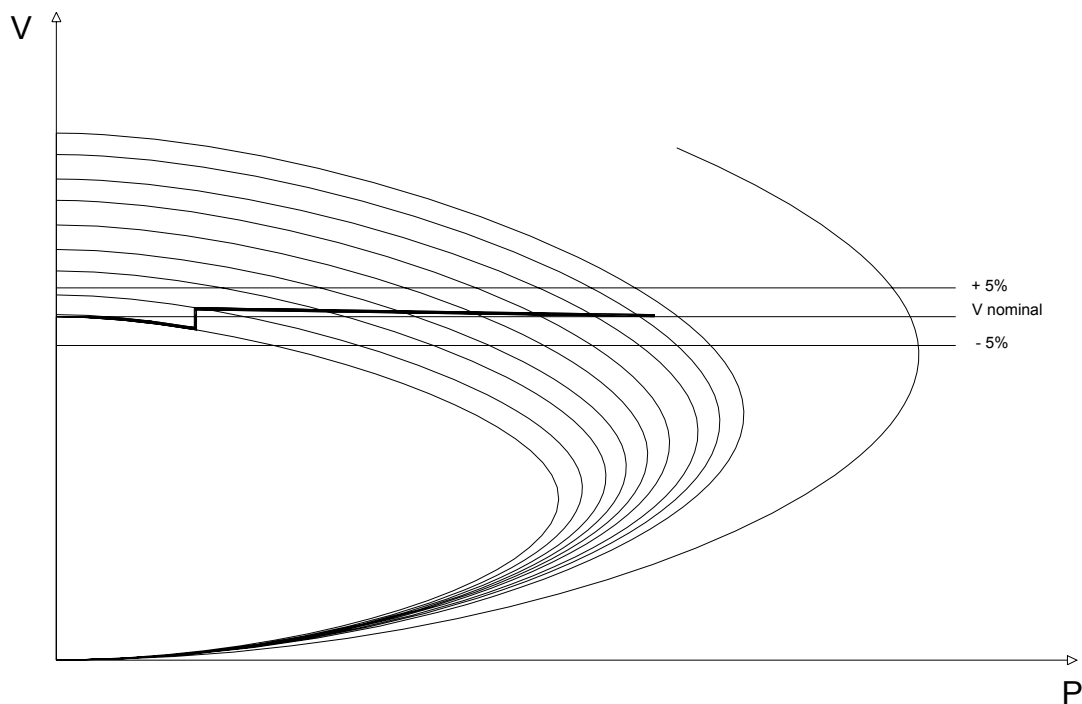


Figura 2.11 – Curvas PV com compensação realizada por um SVC

O controlo linear do SVC está entre os limites determinados pela máxima susceptância da indutância B_{LMX} e a susceptância capacitiva total dos condensadores B_C .

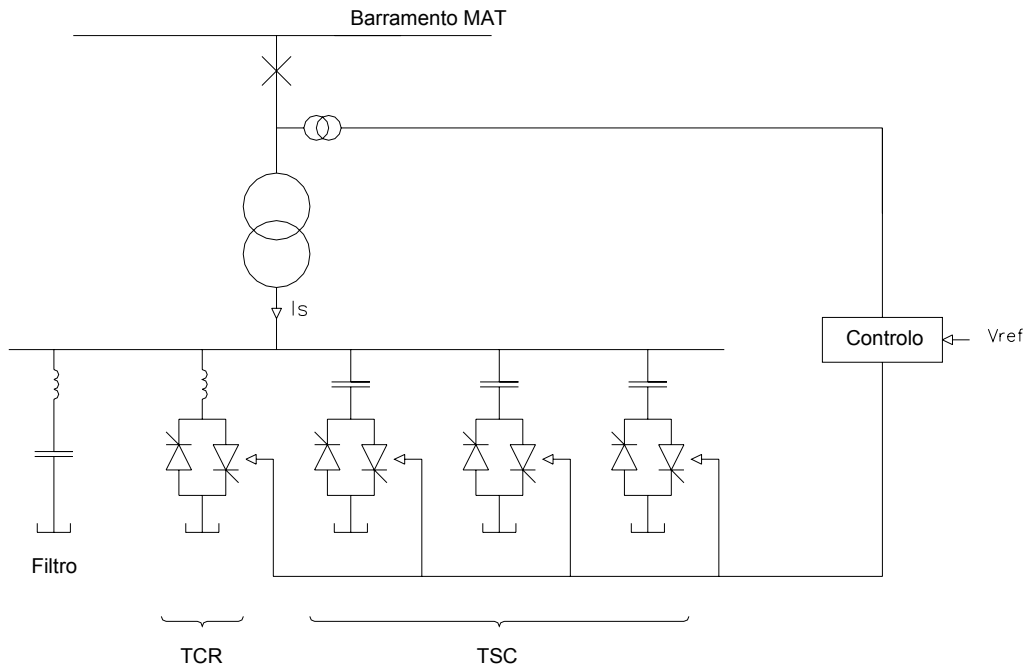


Figura 2.12 – Sistema estático de compensação SVC

Na figura 2.13 apresenta-se a característica VI de um SVC.

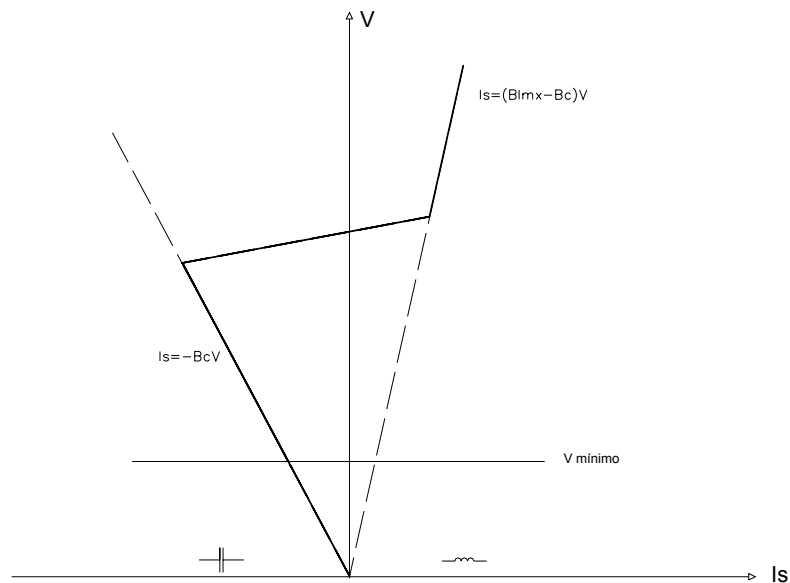


Figura 2.13 – Característica VI de um SVC

2.2.5 – Compensadores síncronos

Os compensadores síncronos são máquinas síncronas como os geradores síncronos, mas não têm a máquina primária para fornecer energia mecânica necessária para a produção de energia activa, limitando-se à produção de energia reactiva. Têm um princípio idêntico ao dos geradores no tocante à capacidade de excitação do rotor. O seu comportamento perante uma descida da tensão da rede também é idêntico ao gerador síncrono, ou seja, uma descida da tensão provoca o aumento da excitação da máquina, que por sua vez provoca o aumento de produção de energia reactiva e a consequente subida da tensão devido ao aumento de produção de energia reactiva.

Comparando com a actuação de um SVC, os compensadores síncronos são mais lentos a responder à descida de tensão da rede devido às constantes da máquina. A capacidade de trabalhar por curtos períodos, em sobrecarga, que pode ir até aos 20 %, é uma vantagem dos compensadores síncronos.

2.2.6 – *STATCON (STATIC synchronous CONDenser)*

Uma alternativa ao SVC é o *STATCON (STATIC synchronous Condenser)* com vantagens relativamente ao primeiro, devido à sua capacidade de sobrecarga e que caracteriza os compensadores síncronos. O *STATCON* utilizam os recentes desenvolvimentos dos *GTOs – gate turn-off thyristors*, que os aproximou dos *Thyristor* de potência. Os *STATCON* têm um tempo de resposta e características de regulação similares ao SVC. Enquanto que os SVC têm os seus limites determinados pela máxima susceptância, os *STATCON*, são limitados pela intensidade de corrente máxima dos *GTOs*.

2.2.7 – *TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation)*

O *TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation)* é um novo tipo de equipamento que pertence à nova família de *FACTS (Flexible AC transmission Systems)*, tecnologias que recentemente foram desenvolvidas. Os *TCSC* são equivalentes aos condensadores série, mas possibilitando a variação contínua de produção de energia reactiva: Além desta vantagem também são rápidos e podem ficar sujeitos a uma sobrecarga por um período curto de tempo. Os benefícios da compensação série para a estabilidade de tensão são aumentados pela controlabilidade dos *TCSC*.

2.2.8 – UPFC (*Unified Power Flow Controller*)

O UPFC (*Unified Power Flow Controller*) é também um novo tipo de equipamento que pertence à nova família de FACTS (*Flexible AC transmission Systems*), tecnologias que recentemente foram desenvolvidas e que abrangem compensação série e paralelo. O controlo é basicamente feito por dois VSC (*Voltage Sourced Converter*), onde equipamentos semicondutores ligam/desligam um condensador comum. A ligação do UPFC ao sistema de energia é realizada por dois transformadores. A estabilidade da tensão pode ser melhorada com a utilização do UPFC, onde a utilização da compensação paralela melhora a tensão e a compensação série melhora a capacidade de transmissão de energia pela rede.

2.3 – Comportamento das cargas eléctricas

O fornecimento contínuo de energia eléctrica às cargas, em condições de estabilidade de tensão, é um dos objectivos fundamentais dos SEE. A análise do comportamento das cargas perante uma instabilidade de tensão é importante para se perceber a sua contribuição para a instabilidade.

A modelação das cargas para o estudo de estabilidade de tensão não é fácil, na medida em que as cargas são compostas por vários tipos de equipamentos com características próprias.

As cargas podem-se dividir em três tipos: cargas de impedância constante (Z), cargas de corrente constante (I) e cargas de potência constante (P). Porém, a carga real é uma combinação destes três tipos de carga.

As cargas de potência constante são o tipo de cargas que cria maiores problemas para a análise de estabilidade de tensão, devido ao seu comportamento perante uma descida de tensão. Caso ocorra uma descida de tensão, aumentam a intensidade de corrente consumida para manter a potência constante. Este aumento de intensidade de corrente implica uma aumento de queda de tensão, que vai implicar novamente um aumento da intensidade de corrente. O ciclo só pára no colapso.

Na prática verifica-se que a carga é constituída maioritariamente por motores de indução. Este tipo de cargas tem uma contribuição muito importante nos fenómenos da instabilidade de tensão. No caso de haver uma situação de instabilidade de tensão que provoque uma descida progressiva da tensão, a partir de um certo valor da tensão, perde-se o ponto de

equilíbrio do motor, provocando a subida do deslizamento e a consequente paragem do motor. Este fenómeno é acompanhado por uma subida da intensidade de corrente consumida, agravando ainda mais a situação de instabilidade de tensão que a provocou.

Os motores de indução têm um grande consumo de energia reactiva. A correcção do seu factor de potência, realizado localmente para um único motor ou para um conjunto de motores, com várias baterias de condensadores, é normalmente aconselhada. Face ao custo da energia reactiva consumida em excesso, também é economicamente viável a correcção do factor de potência.

No trabalho de investigação que se realizou consideraram-se as cargas com um comportamento linear.

2.4 – Controlo preventivo do colapso de tensão

2.4.1 – Estados de operação de um SEE

A caracterização dos estados de residência de um sistema de energia, na perspectiva da estabilidade de tensão, torna-se imprescindível para uma correcta gestão de um SEE. Na figura 2.14 apresentam-se os estados onde pode residir um sistema eléctrico [Fer99].

Actualmente os SEE são complexos devido à sua dimensão e ao grande número de equipamentos que podem influenciar o seu normal funcionamento. A operação de um sistema eléctrico é assim um processo difícil em que são constantes as alterações entre estados. Constantemente há a intervenção de equipas para a realização de acções de manutenção programada, reparação de avarias e mesmo alterações anormais de carga, podem obrigar o sistema a transitar de estado.

Um sistema encontra-se a residir no estado normal se todas as cargas estiverem alimentadas, os valores da tensão e da frequência estiverem dentro dos limites normais e se não existir nenhuma violação dos limites do sistema. Logo que um limite de operação for violado, o sistema transita para o estado de emergência. Exemplos da violação destes limites são um gerador ter atingido o seu limite de produção de energia reactiva, a intensidade de corrente numa linha ser superior ao seu limite máximo, tensão ou frequência fora do intervalo normal.

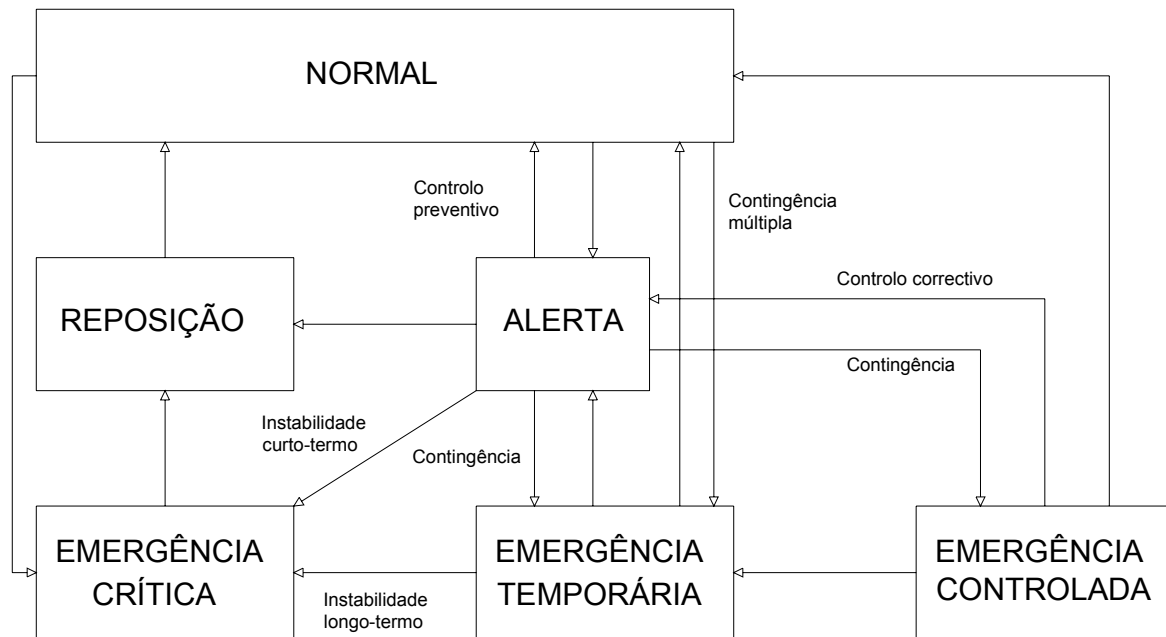


Figura 2.14 – Estados de operação onde pode residir um sistema eléctrico

Inicialmente só foram considerados três estados: normal, emergência e reposição [DyL67]. A referência [Kun94] considera cinco estados: normal; alerta; emergência; “*in extremis*”; e reposição. Como se pode ver na figura 2.14, o estado de emergência foi subdividido em três estados onde pode residir o sistema de acordo com as suas condições de operação. O estado de emergência crítica coincide com o estado “*in extremis*”.

O sistema eléctrico transita do estado normal para o estado de alerta sempre que haja violação dos níveis de segurança ou a possibilidade de contingências devido às más condições atmosféricas. Neste estado todas as variáveis ainda estão dentro do intervalo aceitável.

O sistema transita para o estado de emergência temporária sempre que haja violação dos limites dos componentes: geradores, linhas ou transformadores, ou uma variação da tensão ou frequência para fora dos seus limites. Este estado é caracterizado por ser possível passar para o estado de alerta, caso sejam realizadas manobras pelos operadores, que anulem as violações que provocaram a mudança de estado.

O sistema transita para o estado de emergência controlada quando existe uma situação de incapacidade de aumentar a produção de energia reactiva para ser possível levar as

tensões para os níveis desejados. Este estado é caracterizado pela necessidade de se realizar deslastre de cargas para voltar ao estado de alerta.

O sistema transita para estado de emergência crítica, “*in extremis*” ou colapso, quando ocorrem contingências severas que colocam graves situações de instabilidade que conduzem o sistema a uma situação de pré-colapso ou mesmo de colapso.

No caso de ocorrer uma contingência muito grave ou caso haja uma sucessão de contingências que criem uma situação grave, o sistema pode transitar directamente do estado normal para emergência, não passando pelo estado de alerta. Neste estado as medidas de controlo a tomar têm que ser extremamente rápidas para fazer face a um possível disparo em cascata das protecções levando o sistema ao colapso. Para a passagem ao estado normal é necessário passar primeiro pelo estado intermédio de reposição de serviço. Este estado intermédio permite realizar a reposição de serviço dos diversos componentes do sistema que provocaram esta situação.

Além das medidas de controlo correctivo, na operação dos sistemas de energia, também é possível realizar medidas de controlo preventivo, para fazer face a situações críticas que se aproximam. O cálculo de índices ao colapso de tensão permite antever essas situações críticas. Exemplos dessas medidas preventivas são a ligação de bancos de condensadores ou outros equipamentos, já analisados na secção 2.2, para aumentar a produção de energia reactiva, permitindo levar as tensões aos níveis desejados. Numa situação extrema, caso estejam esgotados todos os recursos disponíveis, sem se inverter a situação de instabilidade de tensão, é aconselhado a realização de deslastre de cargas. O corte de cargas permite equilibrar a relação produção de reactiva e cargas, levando necessariamente à subida das tensões e reduzindo o risco de colapso.

No caso de estudo, analisado no capítulo 3, as medidas de controlo correctivo/preventivo ou foram ineficazes ou não existiram, o que provocou uma situação de pré-colapso de tensão.

Como mostra a figura 2.14, o sistema pode residir em dois tipos de instabilidade: de curto-termo e de longo-termo. O primeiro está relacionado com a ocorrência de uma grande contingência e com a rápida resposta de algumas cargas, como por exemplo os motores de indução. O tempo de duração, deste tipo de instabilidade, está entre os milissegundos e a dezena de segundos. A segunda está normalmente relacionada com o aumento lento das cargas ou o aumento de cargas devido à sua transferência em consequência de uma contingência. Esta instabilidade poderá prolongar-se de 0,5 a 30 minutos.

2.4.2 – Medidas de controlo preventivo do colapso de tensão

Nos SEE, vários tipos de situações, já referidas anteriormente, podem provocar fenómenos de instabilidade de tensão. A partir do momento em que estas situações se manifestem, deverá haver acções correctivas para conduzir o sistema novamente ao estado normal. No entanto também há que realizar medidas preventivas, para que não ocorra a situação mais gravosa e extrema que é o colapso de tensão.

As acções a serem tomadas como medidas correctivas da instabilidade de tensão e preventivas do colapso de tensão devem incidir sobre os vários componentes dos vários subsistemas do sistema eléctrico.

A actuação nos vários equipamentos, apresentados na secção 2.2, para controlo de tensão é imprescindível. As medidas a tomar terão que ter em conta as características específicas de cada equipamento perante a descida da tensão. A capacidade de sobrecarga dos equipamentos é outra das características a explorar.

Como vimos na secção 2.2 são os geradores síncronos os principais garantes do controlo da tensão. Por esta razão, a actuação nestes componentes do SEE é fundamental para a correcção de situações de instabilidade de tensão.

As baterias de condensadores ao terem uma relação custo benefício muito alto, permitiu ao longo do tempo, a sua generalização como método de compensação nos sistemas eléctricos. A colocação de baterias de condensadores em serviço para fazer face a problemas de estabilidade de tensão é imprescindível, dado que, normalmente estão localizadas perto das cargas eléctricas a alimentar.

Como último recurso para evitar o colapso de tensão deverá ser realizado o deslastre de cargas. As cargas com um baixo factor de potência deverão ser as primeiras a ser cortadas, devido à grande influência na tensão do grande consumo de energia reactiva. Outras cargas prioritárias a serem cortadas são as cargas com uma grande percentagem de motores de indução. Os motores de indução, analisados na secção 2.3, contribuem activamente para agravar as situações de colapso de tensão. Do ponto de vista económico porém é mais aconselhado o corte de cargas residenciais do que industriais. Na prática é necessário conciliar as cargas prioritárias do ponto de vista técnico, económico e regulamentar. Cargas como hospitais, bombeiros, tribunais, entre outras, não deverão constar da lista de deslastre, do ponto de vista regulamentar.

2.5 – Métodos de análise de estabilidade de tensão

A análise da estabilidade de tensão de um sistema eléctrico é realizada com base no seguinte sistema de equações matemáticas que caracteriza o sistema:

$$0 = g(x) \quad (2.21)$$

$$\dot{x} = f(x); \quad x(t_0) = x_0 \quad (2.22)$$

O sistema de equações 2.21 é um sistema de equações algébricas não lineares associadas à resolução do FC. O sistema de equações 2.22 é um sistema de equações diferenciais que descreve o comportamento dinâmico das variáveis mais relevantes do sistema de eléctrico. Para a resolução do segundo sistema de equações é necessário a contribuição das soluções do primeiro sistema de equações. O sistema de equações diferenciais deverá incluir o comportamento dinâmico dos componentes do sistema, como por exemplo os geradores e os seus controlos, cargas dos barramentos e outros equipamentos importantes para a análise dinâmica do sistema eléctrico.

Os problemas de análise de estabilidade dividem-se em duas classes [Kun04]:

- estabilidade de tensão a grandes perturbações;
- estabilidade de tensão a pequenas perturbações.

A estabilidade de tensão a grandes perturbações refere-se à capacidade do sistema de energia de manter as tensões, dentro dos valores normais, após ter ocorrido grandes perturbações como a perda de geradores ou linhas. A sua determinação requiere a análise da resposta não linear do sistema num período de tempo suficiente para que se ajustem as interacções de equipamentos como motores, transformadores com regulação em carga e os limitadores da excitação dos geradores. O período de estudo poderá ir de poucos segundos a dezenas de minutos.

A estabilidade de tensão a pequenas perturbações refere-se à capacidade do sistema de energia de manter as tensões, dentro dos valores normais, após a ocorrência de pequenas perturbações como o aumento de carga. Esta forma de estabilidade é influenciada pelas características das cargas, controlos contínuos e discretos. Este conceito é útil para determinar, em cada instante, como o sistema responde a pequenas variações.

Como já foi referido acima, os problemas de instabilidade poderão ter a duração de poucos minutos a dezenas de minutos. Quanto à sua duração, os problemas e instabilidade poderão ser classificados como:

- estabilidade de tensão a longo-termo;
- estabilidade de tensão a curto-termo.

Estes dois tipos de estabilidade foram já analisados na secção antecedente.

A análise da estabilidade de tensão de um SEE é um problema complexo, sendo necessário a modelização dos componentes que intervêm neste processo. A análise dos métodos do controlo da tensão, realizado na secção 2.2, com a análise dos vários componentes do ponto de vista da sua contribuição para a estabilidade de tensão é por isso muito importante para perceber este fenómeno.

A estabilidade de tensão é um fenómeno dinâmico, dado que intervêm muitos equipamentos para a realização do controlo de tensão. O seu estudo poderá ser realizado utilizando o modelo de estabilidade transitória, com a resolução numérica do sistema de equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico dos componentes do sistema que intervêm na estabilidade de tensão. Porém, este tipo de simulações é muito complexo e necessita de elevado número de cálculos, o que penaliza em termos de tempo necessário para as realizar. Pelas razões apontadas, os estudos dinâmicos da estabilidade de tensão, normalmente ficam restringidas aos estudos necessários para os sistemas de protecção e controlos dos sistemas eléctricos.

A análise de estabilidade de tensão de fenómenos lentos necessita da modelização bastante detalhada dos vários componentes do sistema, como por exemplo, alternadores, sistemas de regulação de tensão, transformadores com regulação em carga, modelos das cargas, etc. A modelização do sistema obriga assim à integração numérica das equações diferenciais que definem o seu comportamento. Como resultado da modelização precisa do sistema, também o será dos fenómenos associados ao colapso de tensão. Estes estudos são realizados *off-line*, devido a serem muito demorados, e reservados para os estudos de planeamento ou para a compreensão detalhada de incidentes ocorridos no sistema.

Perante as limitações dos outros modelos, o modelo mais utilizado é o associado ao funcionamento do sistema em regime estacionário ou na linearização, em torno do ponto de funcionamento inicial, das equações de funcionamento dinâmico do sistema. Os métodos estacionários utilizam um modelo associado ao funcionamento em regime estacionário do sistema, como por exemplo o FC. Os resultados obtidos são consistentes com os resultados obtidos nas simulações dinâmicas [Fern01].

As limitações apontadas a outros métodos, restringem ao método estacionário, o modelo possível para o estudo de estabilidade de tensão.

Os métodos estacionários podem-se subdividir em:

- métodos pressupondo uma solução do fluxo de cargas;
- métodos de estabilidade estacionária.

2.5.1 – Índices de distância ao colapso de tensão

Nos SEE, o colapso de tensão corresponde a um apagão que poderá ser parcial ou total de todo o sistema eléctrico. Como já foi referido nas secções anteriores, várias situações podem obrigar o sistema eléctrico a entrar num período de instabilidade de tensão e caminhar rapidamente para o colapso de tensão, caso não sejam efectuadas acções que possam estabilizar ou recuperar o sistema para o estado normal de funcionamento.

Como mostra a figura 2.15, o ponto A é o ponto de colapso e está relacionado com o ponto extremo da curva nariz da curva PV. Este ponto é o ponto limite de estabilidade de tensão em estado estacionário [Ajj92] e está muito próximo do Ponto Máximo de Cargas (PMC) [Pes02]. É contudo possível medir a distância do ponto de funcionamento actual ao ponto de colapso de tensão, através das equações estáticas de FC. A distância é calculada utilizando um FC contínuo, onde as cargas dos barramentos são incrementadas com um factor de carga (λ) constante. Desta maneira é possível atingir o ponto onde a matriz jacobiana se torna singular, que corresponde ao ponto de colapso de tensão, também chamado de ponto limite de estabilidade de tensão [Kun94].

A medida da distância, do ponto de funcionamento actual, ao ponto de colapso de um sistema eléctrico, permite aos gestores do sistema eléctrico conhecer a margem de segurança que o sistema possui até ao colapso de tensão. A constante monitorização da situação, com a análise de índices de distância ao colapso, permite também atempadamente tomar medidas preventivas para que o mesmo não ocorra.

Baseado nos métodos estacionários, já referidos nesta secção, foram desenvolvidos índices de análise à distância ao colapso de tensão, sendo de seguida analisados alguns dos que se consideram mais importantes.

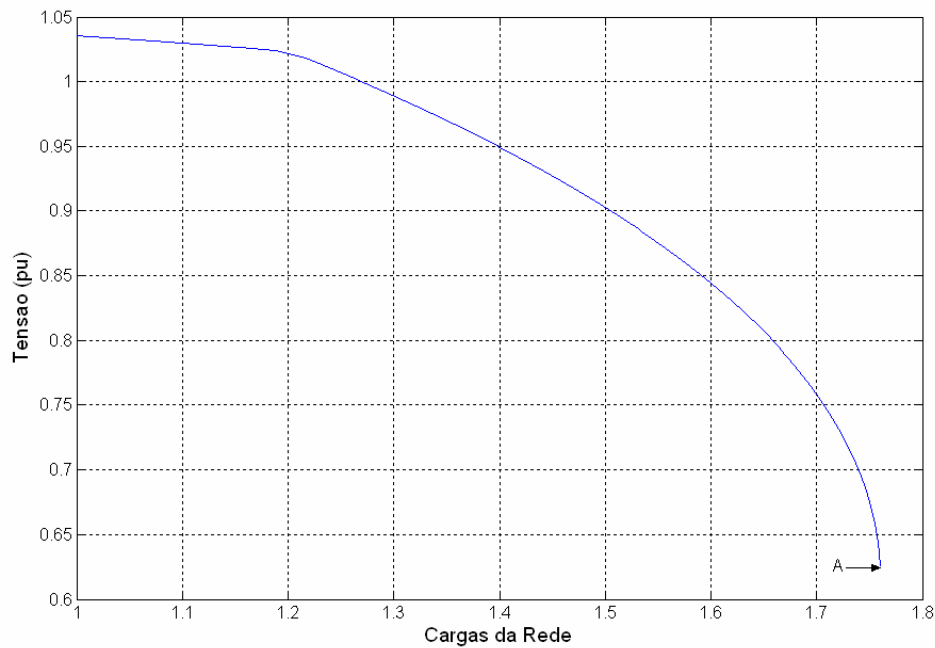


Figura 2.15 – Curva PV de variação da tensão com a carga

Os índices de avaliação da segurança dos sistemas eléctricos relativamente ao fenómeno da instabilidade de tensão podem-se dividir em dois tipos [Cig94]:

- índices baseados no estado actual do sistema;
- índices baseados em grandes desvios do estado actual do sistema.

Enquanto que os primeiros índices consideram apenas o estado actual do sistema, utilizando por isso apenas informação do estado actual do sistema, os segundos índices calculam o aumento possível da carga do ponto de funcionamento actual até ao colapso. O aumento de cargas poderá ser de igual percentagem em todos os barramentos ou só em pontos específicos. De acordo com a abordagem efectuada, o aumento poderá ser só na potência activa ou reactiva ou em ambas.

São exemplos do primeiro grupo de índices os obtidos nas referências [Cig94 e Kes86] a partir das quedas de tensão ou das perdas activas e/ou reactivas, [Can96, Lof92, Lof93 e Tir88] a partir dos valores próprios e/ou singulares da matriz do jacobiano num único FC pelo método Newton-Raphson ou [Ajj2a] pela análise das equações diferenciais.

O método da continuação [Lem90] e da continuação predictor-corrector [Ajj92] inserem-se na segunda classe de índices. Estes dois métodos irão ser analisadas com pormenor, pois o método utilizado nos trabalhos de investigação desenvolvidos no âmbito deste doutoramento é uma variante a estes métodos e será numa secção posterior apresentado.

Método da continuação

Este método utiliza crescimentos homotéticos na carga activa e reactiva em todos os barramentos. Os crescimentos de carga são calculados de tal forma que a rede atinja os pontos de descontinuidade, limites de produção de energia reactiva.

A figura 2.16 apresenta o método da continuação. Como mostra a mesma figura, este método baseia-se em aproximações lineares até se atingir o ponto de colapso de tensão, também chamado curva nariz, calculando a distância ao colapso. A linearização da curva PV, ver figura 2.16, possibilita calcular as margens de potência activa e reactiva pelas equações:

$$P_{im} = P_{xa}^i - P_{xo}^i \text{ e } Q_{im} = Q_{xa}^i - Q_{xo}^i \quad (2.23)$$

Referentes ao barramento i , partindo do estado xo e finalizando no estado xa . O primeiro estado pode ser o estado inicial do sistema e o segundo a situação crítica.

O sistema é estável se os valores da potência activa e reactiva calculados forem superiores aos calculados anteriormente, ou seja, $P_{i \text{ novo}} > P_i$ e $Q_{i \text{ novo}} > Q_i$. Estes valores ao serem superiores localizam os pontos do sistema na parte superior da curva PV ou PQ, ver figura 2.16. Quando esta condição não se verifica, significa o ponto de funcionamento está no ponto crítico ou na parte inferior da curva PV ou PQ, passando o sistema a estar numa situação instável.

As vantagens deste índice são evitar as dificuldades de convergência do FC na proximidade do colapso, o que significa também ultrapassar o problema da singularidade do jacobiano e fornecer o valor de potência activa e reactiva que o sistema pode crescer até atingir o ponto de colapso. Dado que a curva com aproximações lineares é sempre exterior à curva PV real, a distancia ao colapso é sempre superior à distância real, apontando-se um erro inferior a 5 % [Fern01].

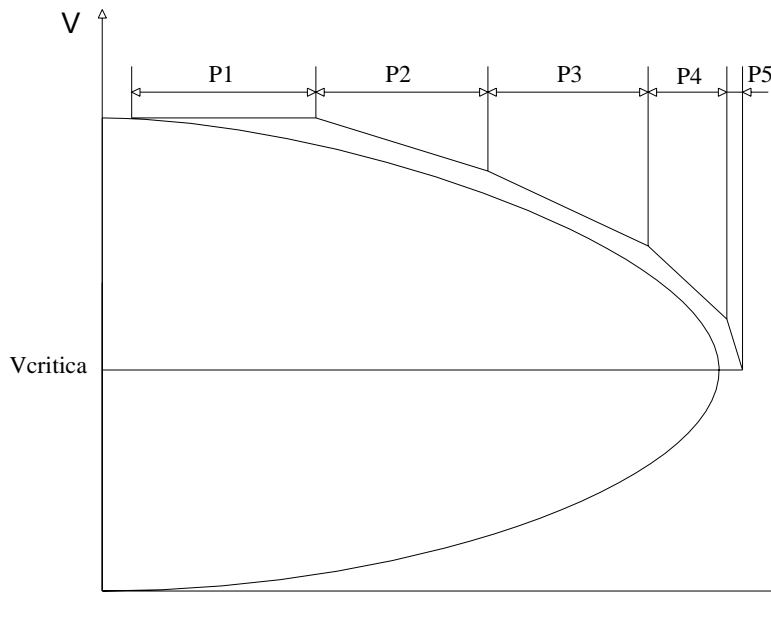


Figura 2.16 – Gráfico do método da continuação

Método da continuação predictor-corrector

O método da continuação predictor-corrector é uma variante ao método da continuação. A figura 2.17 representa o método da continuação predictor-corrector. Neste método é possível definir um aumento de carga independente em cada barramento. O ponto crítico obtido está mais próximo do ponto crítico real, sendo inclusivamente possível passar o ponto crítico da curva, ou seja consegue-se ultrapassar o problema da singularidade do jacobiano. Nesta variante ao método da continuação, definem-se dois índices de distância ao colapso. O primeiro é definido por dV_i/dP_{total} e permite obter o aumento total de potência activa até ao colapso. O segundo é definido por dV_i/dQ_{total} e permite obter o aumento total de potência reactiva até ao colapso. Além destes dois índices também é calculado o barramento que está mais próximo de atingir uma situação de colapso de tensão e por isso considerado o mais fraco.

Factores de sensibilidade

Os índices baseados em factores de sensibilidade são usados por muitas empresas do sector eléctrico. Estes índices permitem detectar problemas de estabilidade de tensão e definir medidas correctivas [Cig94 e Pes02]. Estes índices foram inicialmente usados para

analisar problemas de controlo de tensão em geradores e podem ser definidos da seguinte forma:

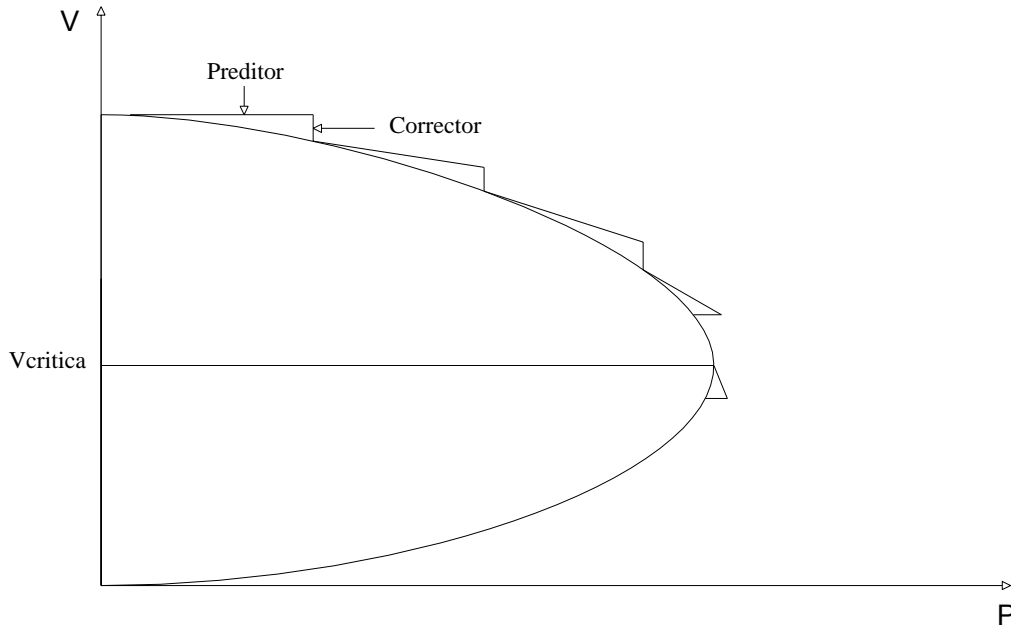


Figura 2.17 – Gráfico do método da continuação preditor-corrector

$$VSF_i = \max_i \left\{ \frac{dV_i}{dQ_i} \right\} \quad (2.24)$$

onde VSF é o factor de sensibilidade de tensão, *Voltage Sensitivity Factor*.

Baseados no mesmo conceito são também usados como índices de estabilidade de sistemas eléctricos. O índice SF, *Sensitivity Factor*, é definido por:

$$SF = \left\| \frac{dZ}{d\lambda} \right\| \quad (2.25)$$

O sistema é representado pela equação $F(z, \lambda)$ e quando os valores de SF se tornam muito altos o sistema pode entrar em colapso. Esta situação é devido a todas as entradas $dz_i/d\lambda$ tenderem para $\pm\infty$ quando o valor do parâmetro λ se aproxima do seu valor máximo, ou seja, λ tende para 0. Representando o parâmetro λ as mudanças de carga, o máximo ponto deste parâmetro está associado ao ponto de colapso, definindo o PMC.

Caso se pretenda só monitorizar a estabilidade de tensão, este índice passa a ser definido por:

$$VSF = \left\| \frac{dV}{d\lambda} \right\| \quad (2.26)$$

Método do Ponto do Colapso

O método do ponto do colapso PoC [Can92] tem como base o facto do jacobiano ser singular no ponto do colapso, tendo um único valor próprio e igual a 0. Para esta situação específica, o jacobiano pode ser caracterizado pelo seguinte conjunto de equações:

$$\begin{aligned} F(\underline{x}, \lambda) &= 0 \\ D_x F(\underline{x}, \lambda) \underline{v} &= 0 \\ \|\underline{v}\| &\neq 0 \end{aligned} \quad (2.27)$$

ou pelo sistema equivalente:

$$\begin{aligned} F(\underline{x}, \lambda) &= 0 \\ D_x^T F(\underline{x}, \lambda) \underline{w} &= 0 \\ \|\underline{w}\| &\neq 0 \end{aligned} \quad (2.28)$$

onde: λ representa o parâmetro associado às cargas; $D_x F(\underline{x}, \lambda)$ é o jacobiano do sistema; \underline{v} é o vector próprio à direita correspondendo ao valor próprio igual a zero; \underline{w} é o vector próprio à esquerda correspondendo ao valor próprio igual a zero.

As condições para que $\|\underline{v}\| \neq 0$ e $\|\underline{w}\| \neq 0$, da não nulidade dos vectores próprios à direita e à esquerda, no ponto crítico, e respectivamente para \underline{v} e \underline{w} , serão as seguintes:

$$[\partial F / \partial \lambda]_{\underline{v}} \neq 0 = k \quad \text{e} \quad [\partial F^T / \partial \lambda]_{\underline{w}} = [\partial F / \partial \lambda] \neq 0 = k \quad (2.29)$$

Substituindo a terceira equação do sistema (2.28) ficará:

$$\begin{aligned} F(\underline{x}, \lambda) &= 0 \\ D_x^T F(\underline{x}, \lambda) \underline{w} &= 0 \\ [\partial F^T / \partial \lambda]_{\underline{w}} &= k \end{aligned} \quad (2.30)$$

O jacobiano J_{poc} associado a este ficará:

$$J_{poc} = \begin{bmatrix} D_x F & 0 & \partial F / \partial \lambda \\ D_x^{T^2} F \underline{w} & D_x^T F & 0 \\ 0 & \partial F / \partial \lambda & 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

O jacobiano $D_x F$ do sistema é singular no ponto crítico, mas o jacobiano aumentado J_{poc} já não é singular, podendo-se resolver o sistema de equações (2.30), por exemplo pelo método de Newton, e obter a solução no ponto crítico.

Com base nos valores iniciais e do ponto crítico de λ , é possível definir um índice ao colapso de tensão, ou seja, a distância ao colapso será calculado por $|\lambda_0 - \lambda_c|$, correspondendo λ_0 ao ponto inicial do sistema e λ_c ao ponto de colapso de tensão.

2.6 – A grandeza FSQV

2.6.1 – O modelo matemático de Fluxos de Cargas

O cálculo do FC permite em regime estacionário conhecer o estado do sistema, ou seja, é possível determinar a tensão nos barramentos em módulo e fase, sendo possível depois calcular as potências nos ramos da rede. As cargas nos barramentos são definidas à partida pela sua potência activa e reactiva, e supõe-se que as pequenas flutuações de tensão e frequência, que ocorrem na exploração do sistema em regime estacionário, não afectam as referidas cargas.

Os FC são uma ferramenta muito importante e muito utilizada no planeamento, para definir a expansão das redes eléctricas, na fase de projecto para a definição das características nominais do equipamento, e também na exploração para a definição da melhor configuração de perdas.

Entre os vários métodos, que permitem efectuar um FC, foi escolhido o método Newton-Raphson, por ser muito rápido na convergência, e permitir calcular factores de sensibilidade, como por exemplo, o coeficiente de sensibilidade $\partial Q/\partial V$, muito importante para a identificação dos barramentos críticos.

A base do método Newton-Raphson (NR), aplicado ao problema do FC, é a expansão da série de Taylor para duas ou mais variáveis [Gra94]. Este método permite, de uma maneira eficiente, determinar as raízes de polinómios, equações trigonométricas, funções exponenciais ou logarítmicas [Bar87]. O método NR é um método que se baseia num processo iterativo, ou seja, é um processo convergente para a solução parando quando o critério de paragem, previamente definido, for alcançado.

O modelo matemático do método NR para o FC [Gra94] é representado pelas equações:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

onde:

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

é a matriz jacobiana, sendo:

- J_{11} é a submatriz jacobiana das derivadas parciais da potência activa em relação aos ângulos de fase da tensão. Esta submatriz tem a dimensão $(npq+npv) \times (npq+npv)$, onde “npq” é o número de barramentos PQ e “npv” o número de barramentos PV, onde é excluído o barramento de referência, que é considerado o barramento 1. Esta matriz tem a forma:

$$J_{11} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

- J_{12} é a submatriz jacobiana da multiplicação das derivadas parciais da potência activa em relação à tensão pela tensão. Esta submatriz tem a dimensão $(npq+npv) \times (npq)$ e é excluído o barramento 1, por ser o barramento de referência. Esta matriz tem o formato:

$$J_{12} = \begin{bmatrix} |V_2| \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & & \vdots \\ |V_2| \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

- J_{21} é a submatriz jacobiana das derivadas da potência reactiva em relação aos ângulos de fase da tensão. Esta submatriz tem a dimensão $(npq) \times (npq+npv)$, continuando a excluir o barramento 1 por ser o barramento de referência. Esta submatriz tem a forma:

$$J_{21} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

- J_{22} é a submatriz jacobiana da multiplicação das derivadas parciais da potência reactiva em relação à tensão pela tensão. Esta submatriz jacobiana tem a dimensão (npq) x (npq) e o seu formato é do tipo:

$$J_{22} = \begin{bmatrix} |V_2| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & & \vdots \\ |V_2| \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

O vector com os desvios de potência activa ΔP_i e reactiva ΔQ_i (2.21) tem a dimensão (npv+npq) + (npq), ou seja, são calculados os desvios ΔP_i para todos os barramentos PV e PQ com excepção do barramento de referência, e os desvios ΔQ_i para todos os barramentos PQ, de acordo com as expressões:

$$\Delta P_i = P_{i,sp} - P_{i,calc} \quad (2.38)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,sp} - Q_{i,calc} \quad (2.39)$$

onde os valores “sp” correspondem aos valores especificados, e os valores “calc” correspondem aos valores calculados.

O vector que contém os incrementos das tensões em fase $\Delta \theta$ e em módulo ΔV (2.32), tem a dimensão (npv+npq) + (npq), ou seja, são calculados os desvios $\Delta \theta$ para todos os barramentos PV e PQ, com excepção do barramento de referência, e os desvios ΔV para todos os barramentos PQ.

Sendo à partida possível o cálculo das variações da potência activa e reactiva ΔP_i e ΔQ_i , a matriz jacobiana da equação 2.32 ficará:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Em cada iteração é necessário inverter a matriz jacobiana ou usar técnicas de manuseamento de matrizes esparsas, bifactorização, por exemplo. Com os novos incrementos das tensões em módulo ΔV e em fase $\Delta \theta$ calculam-se os novos valores das tensões. Como valores iniciais são definidas os seguintes valores:

- 1 pu para o valor das tensões em módulo nos barramentos PQ;
- zero para o valor da fase de todas as tensões.

Na figura 2.18 apresenta-se o fluxograma do FC pelo método de Newton-Raphson. Com base neste fluxograma, foi desenvolvido o programa FCNR (FC pelo método NR). Este software, que é apresentado no anexo B, constitui a peça central para a implementação dos algoritmos.

2.6.2 – A grandeza FSQV

A equação 2.32 relaciona as potências com as tensões através da matriz jacobiana. A matriz jacobiana é constituída por quatro submatrizes com o formato mostrado em 2.33, onde uma das submatrizes é a submatriz jacobiana J_{22} . Os elementos da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} contêm os elementos $V_i(\partial Q_i/\partial V_i)$ 2.37.

A partir da recolha dos elementos $V_i(\partial Q_i/\partial V_i)$, ao longo do processo de carregamento da rede com um FC contínuo, é possível calcular os elementos $\partial Q_i/\partial V_i$ da diagonal principal e realizar a sua soma. A este somatório foi chamado o acrónimo **FSQV- Full Sum $\delta Q/\delta V$** . O seu cálculo é realizado pela equação:

$$FSQV = \sum_{i=1}^n \partial Q_i / \partial V_i \quad (2.41)$$

onde n o numero de barramentos da rede.

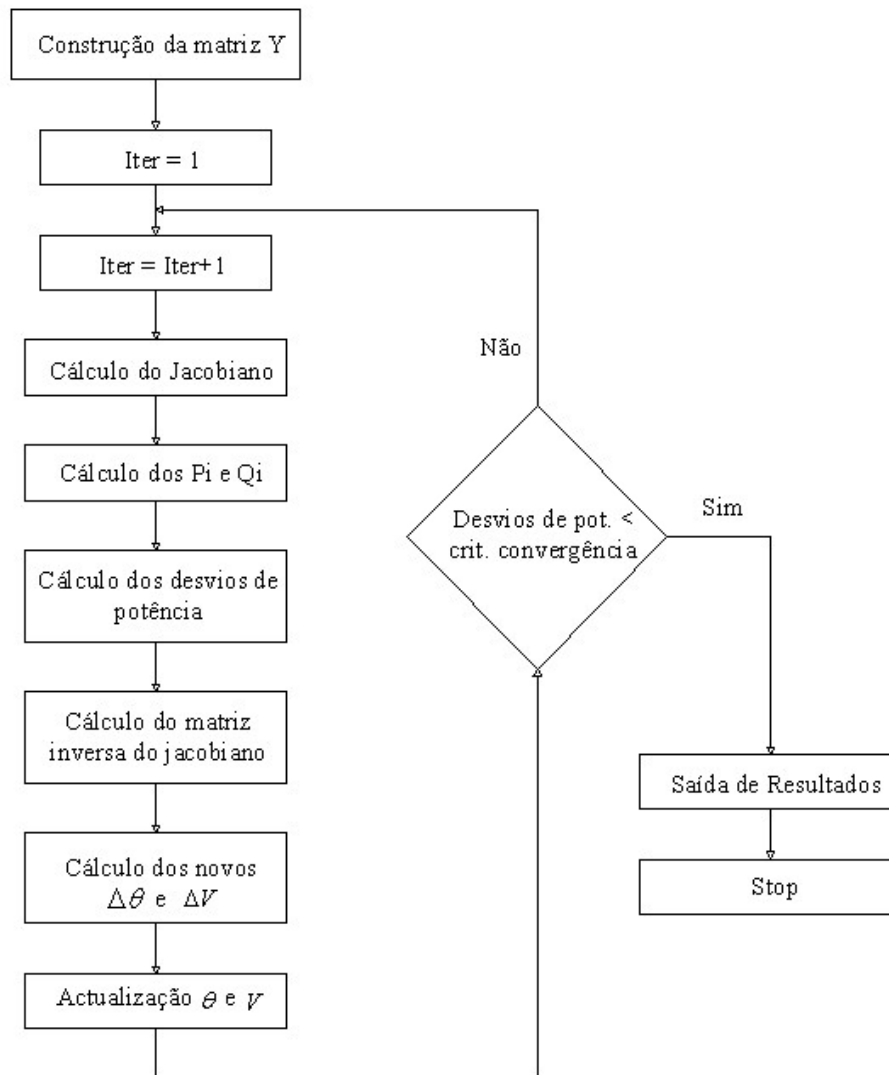


Figura 2.18 – Fluxograma para o FC pelo método de Newton-Raphson

Utilizando um FC contínuo, com um factor de crescimento de cargas λ constante, afectando de igual forma as cargas activas e reactivas, o ponto de colapso é atingido quando a matriz jacobiana se torna singular [Ajj92a]. Em cada FC, do FC contínuo, é calculado o valor FSQV. Para cada rede é possível traçar as curvas FSQV.

Pela análise dos valores obtidos para o FSQV verificam-se que para vários cenários de crescimento de carga, em particular para barramentos com cargas elevadas ou barramentos críticos em termos de colapso de tensão (por exemplo por análise do $\partial Q_i / \partial V_i$ [Kun94]), que o valor FSQV se mantém inalterado no último FC antes do colapso.

Surgiu então a ideia de se utilizar este valor para a detecção do colapso. No capítulo 5 mostra-se que de facto este valor, pode ser utilizado para a detecção do colapso e como referência para um novo índice de distância ao colapso.

Na figura 2.19 é apresentado o fluxograma para o FC contínuo pelo método Newton-Raphson.

Como se pode ver no fluxograma apresentado na figura 2.19, em cada FC é realizado o controlo de produção de energia reactiva. Os geradores síncronos têm limites para a produção de energia reactiva. A detecção desses limites é crucial durante o FC contínuo. Quando os geradores atingem os limites máximos de produção de energia reactiva, a partir desses pontos, os barramentos PV deixam de poder aumentar a produção de energia reactiva para manter a tensão constante. Por essa razão, passam a ter um comportamento de barramentos PQ, mantendo a produção de energia reactiva no seu valor máximo.

Ao aumentar a carga num FC contínuo, o ponto de colapso é alcançado quando a matriz jacobiana é singular e por isso não tem inversa. Há então a necessidade de detectar de uma forma automática o ponto de colapso.

2.6.3 – Detecção automática do ponto de colapso

Nos FC contínuos, as cargas dos barramentos são sucessivamente afectadas por um factor de crescimento de cargas positivo, até que o ponto de colapso seja atingido. No ponto de colapso, o jacobiano é singular não tendo por isso inversa e o software entra num ciclo.

Seria óptimo escolher uma variável que pudesse monitorizar a evolução do FC contínuo, para que fosse possível a definição de um critério de paragem automático do algoritmo.

A análise da evolução do número de iterações em cada FC, durante o FC contínuo foi escolhida, por ser referido em vários artigos científicos, como por exemplo [Ajj92], que o número de iterações cresce à medida que se aproxima o ponto de colapso.

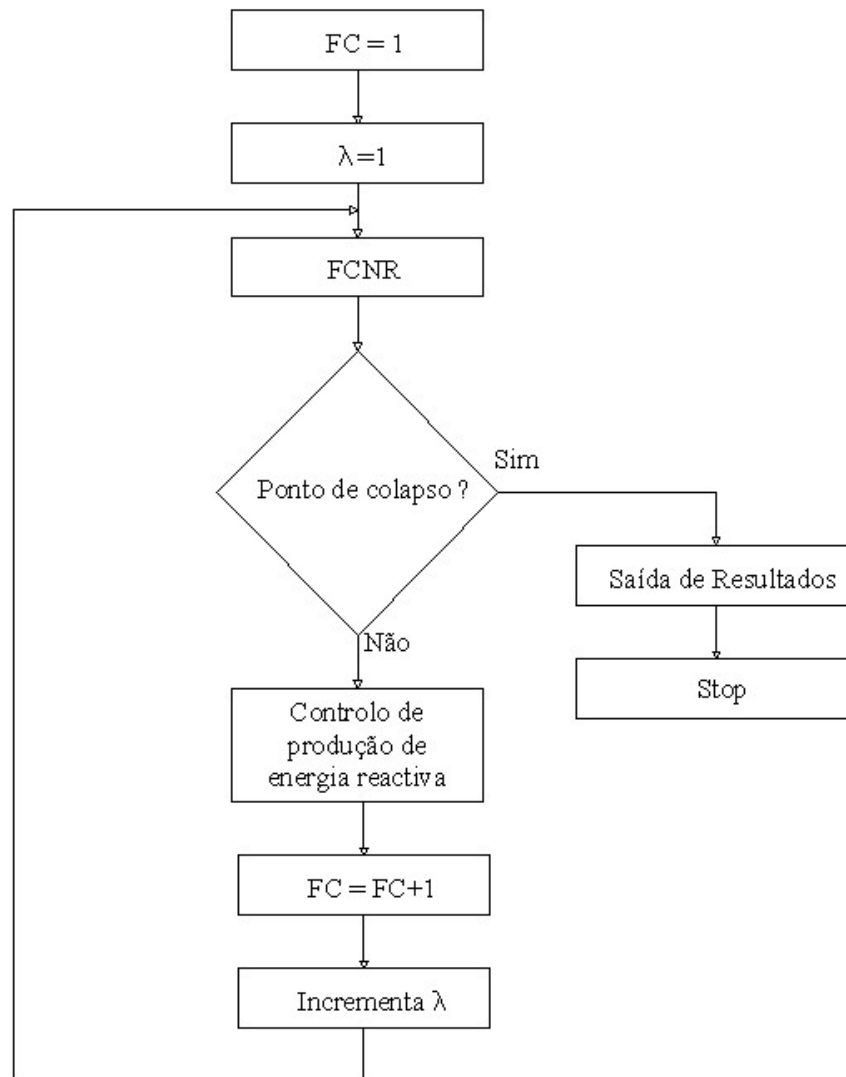


Figura 2.19 – Fluxograma para o FC contínuo pelo método de Newton-Raphson

Definida a variável que se pretende analisar, as rotinas do software desenvolvido sofreram as alterações necessárias, com a finalidade de ser possível a recolha do número de iterações de cada FC, ao longo do FC contínuo.

Como exemplo apresentam-se na figura 2.20 quatro curvas do número de iterações para a convergência dos FC de quatro simulações. Estas simulações foram realizadas com a rede de teste de 57 barramentos do IEEE, que será apresentada no capítulo 5. Estas 4 simulações foram realizadas com um o factor de crescimento de cargas λ positivo com o valor de 10^{-4} pu e os critérios de convergência utilizadas para as 4 simulações foram o desvio de potências de 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} e 10^{-6} pu.

Como se pode ver na figura 2.20, as quatro curvas referentes às quatro simulações monitorizam o número de iterações:

- depois de um reajustamento inicial devido aos valores de partida das tensões e ângulos, o número de iterações para a convergência mantiveram-se constantes durante um largo período da curva;
- a simulação com o menor valor do critério de convergência (10^{-6}), foi a que sofreu a primeira alteração do número de iterações. Esta situação está correcta dado que tem a menor tolerância para a aceitação dos valores para a convergência;
- a simulação com o maior valor do critério de convergência (10^{-4}), foi a última a sofrer a primeira alteração dado que tem a maior tolerância para a aceitação dos valores para a convergência;

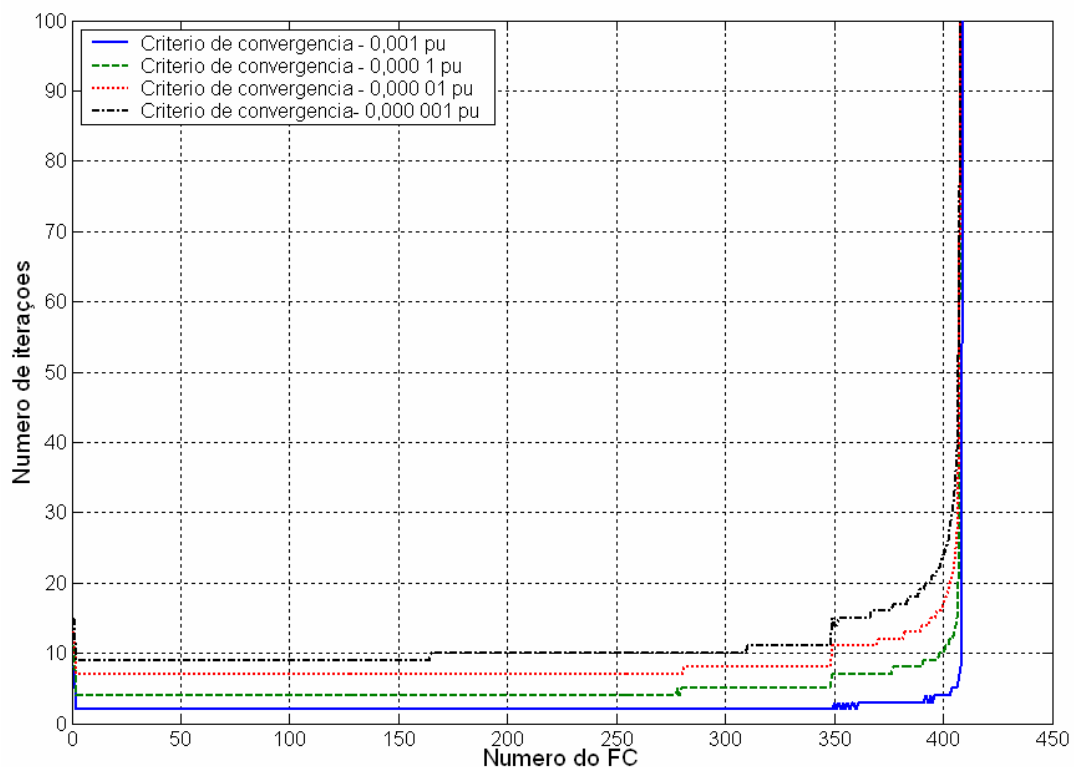


Figura 2.20 – Número de iterações necessárias para convergência da rede de testes de 57 barramentos do IEEE

- com o aproximar do ponto de colapso de tensão as dificuldades de convergência aumentaram, na razão inversa do valor do critério de convergência, ou seja, quanto menor era o valor do critério de convergência mais cedo apareceram as dificuldades

de convergência. Estas dificuldades de convergência provocaram o aumento do número de iterações necessárias para a convergência;

- no ponto de colapso a convergência não foi possível, devido à matriz jacobiana ser singular e não ter inversa. Nesse ponto, o número de iterações cresceu para valores que não podem ser confundidos com as dificuldades de convergência sentidas nos últimos FC devido à proximidade do ponto de colapso;
- dando uma tolerância ao número de iterações, para que não se possa confundir com as dificuldades de convergência, o algoritmo pode parar. Nestas quatro simulações definiu-se como critério de paragem as 100 iterações.

Na tabela 2.1 apresentam-se os "ponto de quebra" das curvas apresentadas na figura 2.20, caracterizados por haver alteração do número de iteração.

O trabalho realizado permitiu automatizar a paragem do algoritmo no ponto de colapso.

2.6.4 – Análise da evolução do valor FSQV junto ao ponto de colapso

Para analisar o comportamento da grandeza FSQV com vários cenários de carga realizaram-se simulações com as redes de teste de 14 e 57 barramentos. Após a realização de simulações com onze cenários de carga para a rede de testes de 57 barramentos, verificou-se que o valor do FSQV, correspondente ao último FC antes do colapso, tinha uma variação nula. Esta situação possibilitava a utilização do FSQV na detecção do ponto de colapso, realizando unicamente a análise do último valor FSQV antes do colapso, o que permite definir um novo método de detecção do colapso.

Na figura 2.21 são apresentadas as variações dos valores FSQV e da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} dos barramentos 2 e 3, referentes aos cenários B1 e B6 definidos para a rede de 57 barramentos. A análise destas variações é importante dado que as cargas dos barramentos 2 e 3, no cenário B6, aumentam mais 200 % em relação às restantes cargas da rede.

Tabela 2.1 – Número de iterações dos FC, do FC contínuo, para a convergência da rede de simulação de 57 barramentos do IEEE

Número do FC dos pontos de quebra	Número de Iterações para o critério de convergência			
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
1	8	11	13	15
2	1	4	7	9
165				10
178		5		
180			8	
310				11
349		7	11	
350	3			14
367				16
370			11	
377		8		17
381			13	
384				18
389				19
390			14	
391		9		19
391	4			10
394			15	
395				11
397		9	16	11
398		10		
399		11		13
400			17	14
401			18	15
401			19	16
403		11	10	18
404	5		11	30
405		13	13	33
406		15	17	39
407	6	19	35	51
408	8	100	100	100
409	100			

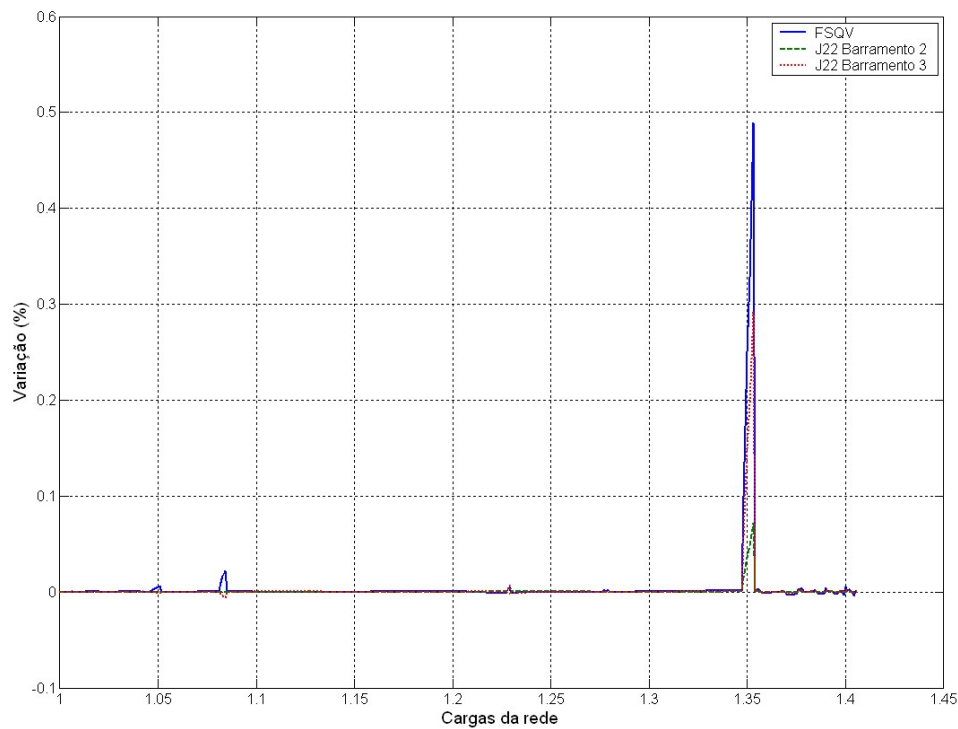


Figura 2.21 – Curvas da variação dos valores FSQV e valores da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} dos barramentos 2 e 3, referentes respectivamente aos cenários B1 e B6 (simulações realizadas com a rede de testes de 57 barramentos do IEEE)

Como se pode ver na figura 2.21, as maiores variações concentram-se na zona dos FC correspondentes ao ponto de carga 1.35. Estas variações vão ser objecto de análise no capítulo 5. Neste momento interessa somente analisar as variações nos últimos FC antes do colapso.

Na figura 2.22 apresentam-se as variações, dos últimos 10 FC, da comparação dos valores FSQV e valores da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} dos barramentos 1 a 57, respectivamente dos cenários B1 e B6.

Na figura 2.22, a curva referente à variação da grandeza FSQV destaca-se das restantes 57 curvas. As 57 curvas da variação dos valores da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} , aparecem muito sobrepostas, não se destacando nenhuma.

Na figura 2.23 apresentam-se as curvas de variação, dos últimos 10 FC, dos valores da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} dos barramentos 1 a 10, da comparação respectivamente dos cenários B1 e B6. Como se pode ver na mesma figura, a variação referente aos barramentos 2 e 3, barramentos que sofreram um aumento de carga de 200 %, têm uma variação da mesma grandeza dos restantes barramentos e havendo mesmo variações superiores.

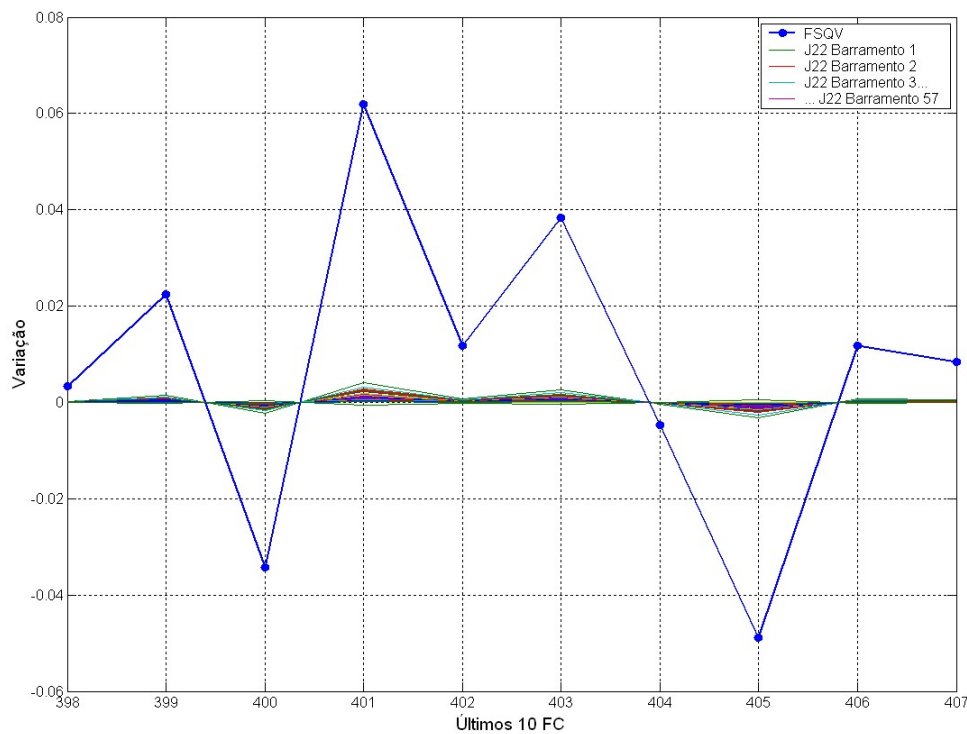


Figura 2.22 – Variações dos valores FSQV e valores da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} dos barramentos 1 a 57 da comparação respectivamente dos cenários B1 e B6 (simulações realizadas com a rede de testes de 57 barramentos do IEEE)

Esta linha de investigação, pretendia justificar a variação zero da comparação do valor FSQV entre os cenários B1 e B6, com eventuais aumentos das variações dos barramentos 2 e 3 e possíveis compensações pelos outros barramentos.

O cenário B1 corresponde ao cenário base onde foi utilizado um factor de crescimento de cargas igual para todos os barramentos, e no cenário B6, as cargas dos barramentos 2 e 3 cresceram mais 200 % do que os restantes barramentos. Porém, após análise dos resultados, pode-se concluir que a variação é zero porque as variações dos valores da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} , de todos os barramentos, referentes à comparação entre os cenários B1 e B6, são muito baixos e desprezáveis tal como os erros do FSQV. Portanto, não se confirma a tese formulada à partida.

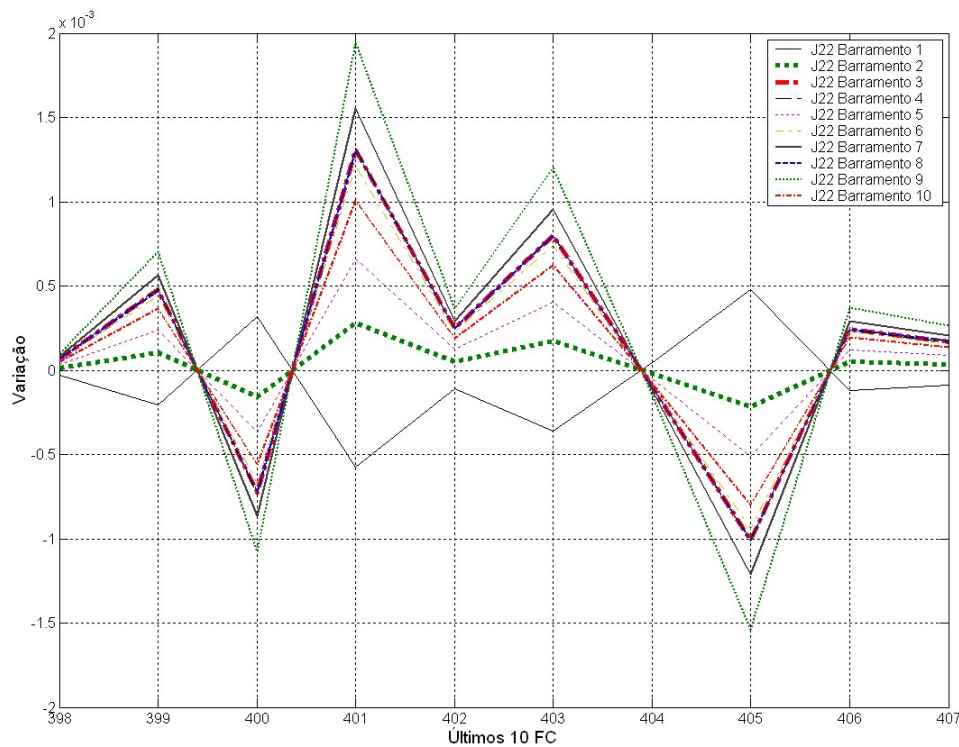


Figura 2.23 – Curvas de variação dos valores FSQV e da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} dos barramentos 1 a 10, da comparação respectivamente dos cenários B1 e B6 (simulações realizadas com a rede de testes de 57 barramentos do IEEE)

Na figura 2.24 apresentam-se as curvas de variação dos valores FSQV e da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} dos 14 barramentos desta rede, da comparação entre os cenários A1 e A9.

O cenário A9 corresponde a um aumento da carga dos barramentos críticos, 12 e 14, de mais 100 % em relação às cargas dos outros barramentos.

Como se pode ver na figura 2.24, a curva de variação do valor FSQV destaca-se das restantes curvas. As curvas de variação dos valores da diagonal da submatriz e referentes aos barramentos 12 e 14, são sempre inferiores a curvas de variação de outros barramentos em que o aumento de carga foi inferior.

Na figura 2.25 apresentam-se as curvas de variação dos valores FSQV e dos valores da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} dos 14 barramentos, da comparação dos cenários A1 e A5.

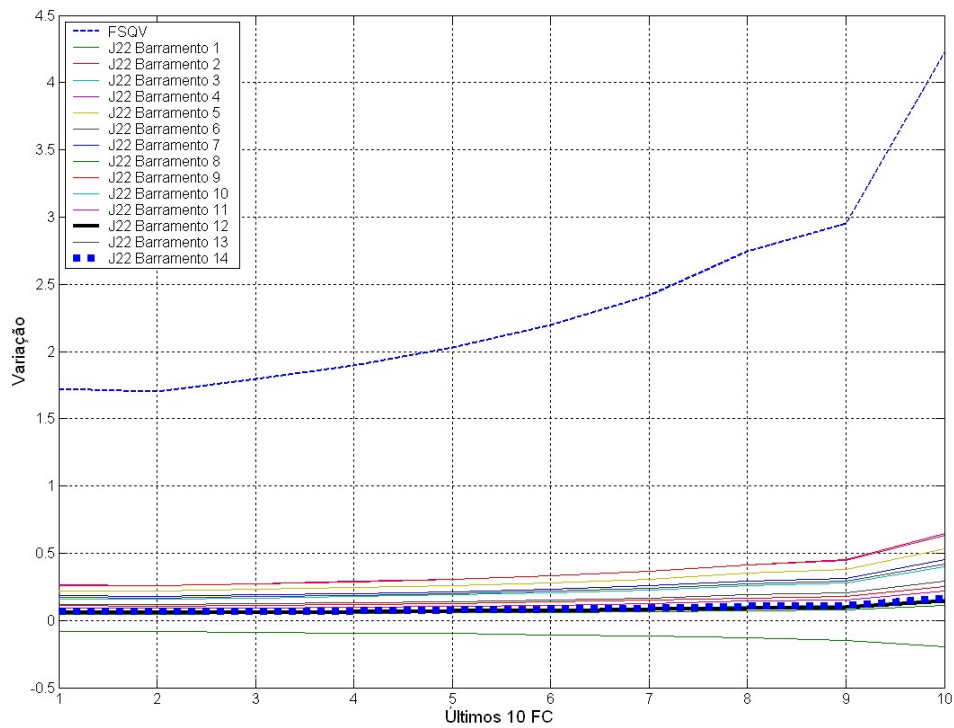


Figura 2.24 – Curvas de variação dos valores FSQV e da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} dos 14 barramentos, da comparação respectivamente dos cenários A1 e A9 (simulações realizadas com a rede de testes de 14 barramentos do IEEE)

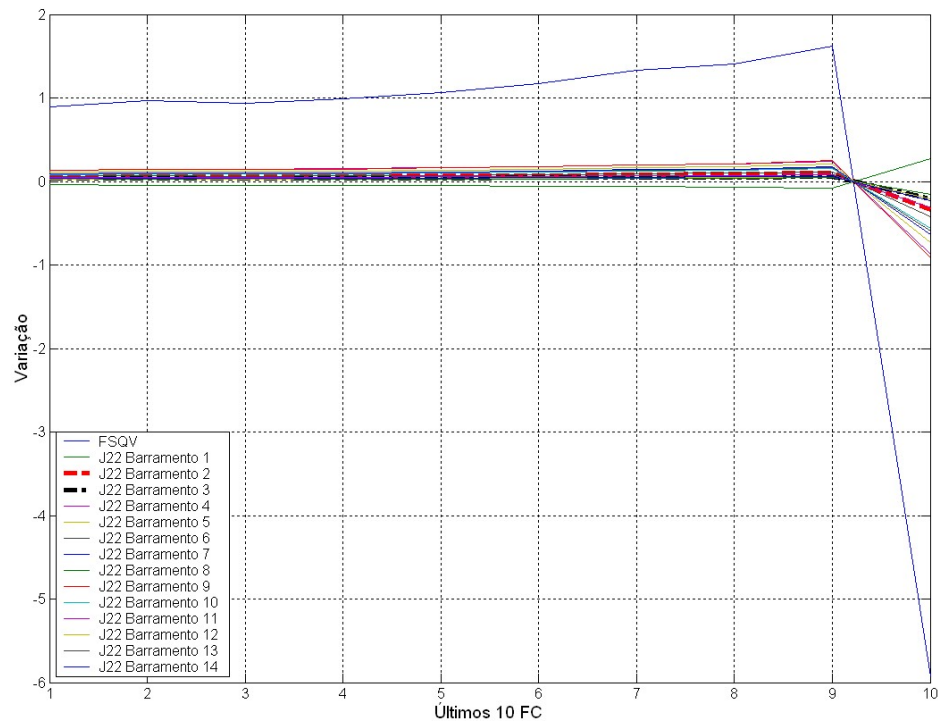


Figura 2.25 – Curvas de variação dos valores FSQV e da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} dos 14 barramentos, da comparação respectivamente dos cenários A1 e A5 (simulações realizadas com a rede de testes de 57 barramentos do IEEE)

O cenário A5 corresponde a um aumento da carga dos barramentos com cargas reactivas mais pesadas, 2 e 3, de mais 100 % em relação às cargas dos outros barramentos.

Como se pode ver na figura 2.25, as curvas de variação referentes aos barramentos 2 e 3, são sempre inferiores a curvas de variação dos outros barramentos em que o aumento de carga foi inferior.

Esta segunda parte, desta fase da investigação, iniciou-se pela formulação de uma tese que mais uma vez não se confirmou, ou seja, existem variações dos valores FSQV, mas não se detecta a origem dos mesmos, especialmente nas curvas de variação referentes aos barramentos que sofreram maiores aumentos. Isto significa que as variações do FSQV têm origem num aumento de todos os valores da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} .

Após a investigação realizada e a análise dos resultados, é possível definir uma tese final para justificar a variação nula, dos valores FSQV, antes do colapso:

A variação nula é devido há existência de variações muito baixas dos valores da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} . O aumento da carga nas barramentos com situações extremas, cargas muito pesadas ou barramentos críticos, não têm influência nestas variações. A variação nula é então uma característica desta grandeza FSQV.

2.7 – Conclusões

Neste capítulo começou-se por caracterizar os métodos de controlo de tensão dos sistemas eléctricos. O gerador síncrono é o principal garante das tensões nas redes devido à sua capacidade de produzir energia reactiva. Por isso a análise das suas características e limitações é fundamental pela importância que tem para os sistemas eléctricos. O transformador com regulação em carga é também importante para o controlo da tensão nos barramentos das subestações. Os aumentos/diminuições de carga provocam variações nas tensões dos barramentos que são compensadas pela adequação da tomada do transformador. Outra forma de realizar a compensação de redes eléctricas, muito usada em todos os subsistemas do sistema eléctrico, por ter uma óptima relação preço/benefício, é através de baterias de condensadores ligadas em série ou paralelo. A sua análise foi, por isso, também importante. Também foram analisadas outras formas de controlo de tensão como compensadores síncronos, SVC, STATCON e TCSC. Estes equipamentos mais recentes, com excepção dos compensadores síncronos, são ainda bastante caros, mas têm características bastante interessantes se comparados com as formas tradicionais de compensar as redes eléctricas.

A contribuição das cargas eléctricas nas situações de instabilidade de tensão é importante na medida que, certo tipo de cargas, agravam a situação de instabilidade. Nessa situação estão os motores de indução, que constituem maioritariamente as cargas típicas de uma rede eléctrica. Perante uma situação de instabilidade que provoque a descida da tensão, aumentam o consumo, agravando ainda mais a situação de instabilidade de tensão que a provocou.

Foram também analisadas as causas que podem provocar situações de instabilidade de tensão, assim como, também, as medidas de controlo preventivo de colapsos de tensão. Os colapsos de tensão são a fase extrema das instabilidades de tensão. Se as instabilidades de tensão não forem resolvidas ou estabilizadas, podem ocorrer actuações em cascata das protecções, originando um apagão parcial ou total do sistema eléctrico.

Face ao risco de colapso de tensão dos sistemas eléctricos, a obtenção de índices de distância ao colapso, torna-se imprescindível. Os gestores dos sistemas podem desta forma monitorizar o seu estado e continuamente tomar medidas preventivas para que não ocorram estas situações. O estudo de métodos de cálculo da distância ao colapso foi uma tarefa central neste capítulo.

Foi analisada o estado da arte das metodologias de análise da estabilidade de tensão e dos métodos de cálculo de índices de distância ao colapso de tensão.

O aumento da capacidade do processamento pelos PC, levou a que fosse adoptada a solução mais simples e mais óbvia, para o cálculo da distância ao colapso, os FC contínuos com um factor de crescimento de cargas constante. Seguidamente foi estudada a grandeza FSQV para determinar o ponto de colapso.

Por fim foi apresentada a investigação realizada para justificar o erro zero do valor FSQV antes do colapso. A partir da análise dos resultados foi elaborada uma tese de justificação do mesmo erro nulo.

Capítulo 3

A ESTABILIDADE DE TENSÃO E OS APAGÕES - UM CASO DE ESTUDO, O APAGÃO DE 14 DE AGOSTO DE 2003

CAPÍTULO 3

A ESTABILIDADE DE TENSÃO E OS APAGÕES - UM CASO DE ESTUDO, O APAGÃO DE 14 DE AGOSTO DE 2003

3.1 – Introdução

No dia 14 de Agosto de 2003 ocorreu um apagão que afectou a parte este e nordeste dos Estados Unidos e a província de Ontário do Canadá. Foram afectados os estados de Ohio, Michigan, Pennsylvania, New York, Vermont, Massachusetts, Connecticut, New Jersey e a província de Ontário do Canadá, totalizando uma população afectada estimada em 50 milhões de pessoas e uma carga eléctrica de 61,8 MW. Este apagão iniciou-se poucos minutos após as 16 horas locais. Nalgumas partes dos Estados Unidos, a energia eléctrica só foi reposta ao fim de 4 dias e em partes de Ontário só ao fim de 1 semana é que estava completamente reposta a energia. O custo total do apagão, só nos Estados Unidos, foi estimado entre 4 e 10 biliões de dólares americanos. No Canadá o PIB baixou 0,7 %, em Agosto, e provocou uma perda de 18,9 milhões de horas de trabalho, equivalente a 2,3 milhões de dólares canadianos em encomendas não satisfeitas.

A sua dimensão, impacto social e económico e a baixa probabilidade de ocorrer com esta dimensão, sugerem que se considere este apagão como um “caso de estudo” e que se realize uma análise cuidada do seu “*Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations*” realizado pela “*U.S.-Canada Power System Outage Task Force*” [Rep04] e [Ner04].

A missão desta *Task Force* foi investigar as causas deste apagão e elaborar um conjunto de acções e recomendações para minimizar a probabilidade e a amplitude de similares eventos no futuro. Esta *Task Force* numa primeira fase investigou o apagão para determinar as suas

causas e numa segunda fase desenvolveu as recomendações. A mesma *Task Force*, liderada pelo Secretário de Estado Americano e pelo Ministro Canadiano dos Recursos Naturais, criou três grupos de trabalho: Sistema Eléctrico; Sector Nuclear; Segurança. Nestes grupos de trabalho estiveram representadas autoridades federais, estaduais e provinciais e das agências governamentais canadianas.

Este capítulo está inserido na problemática que se pretende estudar nesta dissertação de Doutoramento – Estabilidade de Tensão de Redes Eléctricas – complementando assim o estudo teórico realizado, com a análise de um relatório realizado por uma *Task Force*, organizada para o efeito e a pedido do Presidente dos USA e Primeiro Ministro do Canadá.

3.2 – Porque acontecem os apagões

Actualmente os SEE são constituídos por milhares de equipamentos que podem interferir no seu normal funcionamento. Por isso, é frequente acontecerem contingências que provocam interrupções do fornecimento de energia eléctrica. Naturalmente que nos períodos caracterizados por situações extremas, como condições atmosféricas adversas, vagas de calor ou frio, a probabilidade de acontecer um incidente aumenta. A probabilidade de acontecer um incidente não é igual para todos os escalões de tensão. Consoante aumenta o escalão da tensão é natural que diminua o risco de interrupção, pois por exemplo a rede de transporte é constituída por menos linhas, sendo mais robustas, e menos subestações, o que permite ter menos equipamentos em série que possam diminuir a fiabilidade do sistema. Por outro lado, consoante o nível de tensão aumenta também aumenta a área afectada, em caso de interrupção, devido à maior carga das linhas. A exploração em anel das redes de transporte evita, muitas vezes, a interrupção de cargas, caso seja aplicado o critério “N-1” na alimentação das cargas. Isto significa que caso saia de serviço uma linha ou transformador, há uma alternativa para a energia eléctrica chegar à carga a alimentar.

3.2.1 – As interrupções de energia no SEE Português

Para materializar estes conceitos relativos à qualidade de serviço das redes eléctricas que constituem os SEE, e recorrendo à informação disponibilizada na internet pelas empresas portuguesas REN e EDP, foi calculada a frequência das interrupções de energia nas várias redes.

Nas tabelas 3.1 a 3.4 apresentam-se respectivamente as interrupções ocorridas no período de 1998 a 2002 na rede MAT, e no ano de 2003 nas redes AT, MT e BT.

Tabela 3.1 – Número de interrupções por classes de duração da rede de transporte portuguesa [REN03]

Ano	1seg. <Ti ≤<1min.	1min. <Ti ≤<3min.	3min. <Ti ≤<10min.	Ti ≥10 min.	Totais
1998	5	40	6	11	62
1999	4	37	5	8	54
2000	2	7	14	29	52
2001	2	7	10	6	25
2002	0	5	9	3	17

Tabela 3.2 – Número de ocorrências na rede AT da EDP Distribuição [EDP04]

TIPOS DE OCORRÊNCIAS	TEMPOS (min)	ORIGEM DAS OCORRÊNCIAS	
		REDE AT	OUTRAS
Incidentes que não originaram interrupções a clientes		312	25
Religações (com tempos inferiores a 1 segundo)	t < 1	356	0
Acidentais curta duração	1 ≤ t ≤ 3	290	105
Acidentais longa duração	t > 3	271	107
Previstas curta duração	1 ≤ t ≤ 3	12	0
Previstas longa duração	t > 3	10	3
TOTAL		1 251	240

Tabela 3.3 – Número de ocorrências na rede MT da EDP Distribuição [EDP04]

TIPOS DE OCORRÊNCIAS	TEMPOS [min]	ORIGEM DAS OCORRÊNCIAS	
		REDE MT	OUTRAS
Religações (com tempos inferiores a 1 segundo)		10 199	127
Acidentais Curta Duração	$1 \leq t \leq 3$	5 936	415
Acidentais Longa Duração	$t > 3$	10 155	694
Previstas Muito Curta Duração	$t < 1$	681	16
Previstas Curta Duração	$1 \leq t \leq 3$	1 141	64
Previstas Longa Duração	$t > 3$	7 352	297
TOTAIS		35 464	1 613

Tabela 3.4 – Número de ocorrências na rede BT da EDP Distribuição [EDP04]

TIPOS	ORIGEM DAS OCORRÊNCIAS	
	REDE BT	INSTALAÇÃO CLIENTE BT
ACIDENTAIS	30 737	186 105
PREVISTAS	3 836	179
TOTAL	34 573	186 284

Tabela 3.5 – Frequência das interrupções de energia eléctrica nas redes portuguesas nos períodos considerados

Rede	Nº Int. por mês
MAT (1998)	5,2
MAT (1999)	4,5
MAT (2000)	4,3
MAT (2001)	2,1
MAT (2002)	1,4
MAT (média 1998 a 2002)	3,5
Rede	Nº Int. por dia
AT	4,2
MT	104,4
BT	622,1

Como se pode ver na tabela 3.5, a frequência das interrupções ocorridas na rede MAT, 3,5 interrupções em média por mês e no período de 1998 a 2002, é muito baixa relativamente à frequência da rede AT, 126 interrupções em média por mês no ano de 2003. Por outro lado e relativo ao mesmo ano de 2003, na rede MT ocorreram por dia, em média, 25 vezes mais interrupções do que na rede AT e, 6 vezes mais na rede BT do que na rede MT. Estas diferenças não se podem dissociar do tipo de rede, ou seja, se compararmos a rede MAT em relação à rede AT, a primeira é constituída por um menor número de linhas, sendo estas normalmente mais robustas mecanicamente devido à necessidade de afastar mais os condutores para ser conseguido o isolamento eléctrico necessário entre fases ou entre fase e a terra. O número de subestações também é em menor número e a sua localização é normalmente fora das zonas urbanas.

O número de interrupções é um indicador que, por si só, pode não dar a verdadeira dimensão das interrupções. Por isso é usual o uso do “Tempo de Interrupção Equivalente” (TIE) para complementar o primeiro indicador de qualidade de serviço. O TIE compara a energia não fornecida nas interrupções e a fornecida pela rede no mesmo período. O TIE converte a energia não fornecida, nas várias interrupções, numa única interrupção da rede, como fosse um apagão à totalidade das suas cargas.

Na figura 3.1 apresentam-se os TIE nos anos 1994 a 2004 devido às interrupções de energia provocadas por contingências na rede de transporte portuguesa.

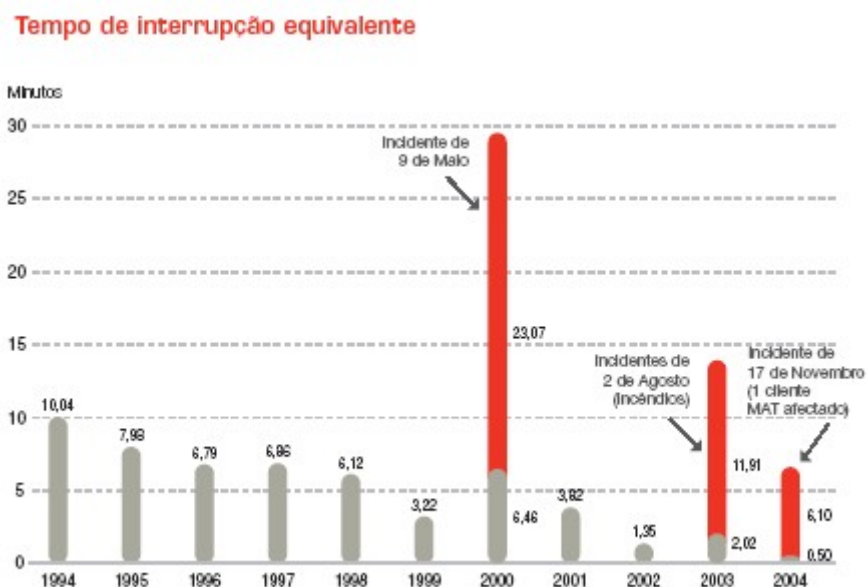


Figura 3.1 – Tempo de interrupção equivalente das interrupções ocorridas na rede de transporte portuguesa [REN04]

Como se pode ver na figura 3.1, o ano de 2000, com praticamente o mesmo número de interrupções do ano de 1999, tem um TIE 9,2 vezes maior. Uma única interrupção que ficou conhecida pelo “apagão da cegonha” provocou o equivalente a um apagão global da rede de transporte de 23,07 minutos. Mesmo retirando este apagão parcial do país as restantes interrupções provocaram um TIE que é o dobro em relação ao ano anterior. Na figura 3.1 também é possível analisar o TIE do último apagão parcial ocorrido no SEE português nos últimos dez anos e outra situação que afectou um cliente MAT.

3.2.2 – As interrupções de energia mais severas ocorridas no SEE Americano

Na figura 3.2 apresentam-se as interrupções mais importantes ocorridas no SEE Norte-americano no período de 1984 e 1997.

Como se pode ver na figura 3.2, no período de 1984 a 1997, ocorreu uma interrupção que afectou mais de 10 milhões de clientes. A probabilidade de ocorrer uma interrupção desta dimensão é de uma interrupção em 10 anos. A probabilidade de ocorrer um incidente aumenta com a diminuição do número de clientes afectados. Cada círculo representa a maior interrupção ocorrida no período considerado.

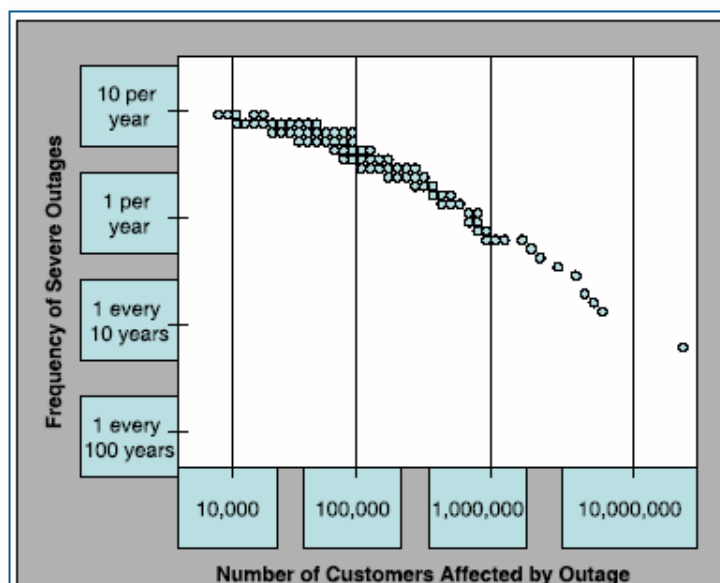


Figura 3.2 – Interrupções mais importantes ocorridas no SEE Norte Americano no período de 1984 a 1997

Anteriormente ao apagão de Agosto de 2003 já tinham ocorrido cinco apagões no SEE Norte-americano, que pela sua dimensão requerem uma análise especial:

- em 6 de Novembro de 1965 ocorreu uma interrupção afectando 30 milhões de pessoas e uma carga de 20 GW, por um período de 13 horas. A saída de uma de cinco linhas de 230 kV devido à actuação do relé *backup* da protecção, provocou a redistribuição do fluxo de energia pelas outras 4 linhas provocando o seu disparo. Em consequência inicia-se um fenómeno de saída em cascata que provoca o apagão ao nordeste dos USA;
- em 13 de Julho de 1977 ocorreu uma interrupção que afectou 9 milhões de pessoas na cidade de Nova York e uma carga de 9 GW por um período de 26 horas. Uma série de eventos provocam a separação da rede da empresa Consolidated Edison das redes adjacentes. O colapso iniciou-se quando duas linhas de 345 kV dispararam devido à queda de um relâmpago num poste comum às duas linhas. Com a perda destas linhas que transportavam a energia para Nova York, a produção de energia local não foi suficiente para alimentar as cargas e provocou o colapso da rede;
- em 22 de Dezembro de 1982 ocorreu uma interrupção que afectou 5 milhões de pessoas e uma carga de 12,35 GW na costa oeste dos USA. O apagão iniciou-se quando fortes ventos provocam uma avaria mecânica num poste de uma linha dupla de 500 kV que afectou os circuitos eléctricos. Em consequência o SEE separou-se em 4 partes, “ilhas”, após uma tentativa falhada de separação em 2 partes. Posteriormente, na análise efectuada verificaram a existência de problemas de coordenação das protecções que levaram ao disparo de geradores. Esta situação, também não permitiu a realização de manobras de acordo com o plano de acção existente para intervenção em caso de emergência. Outra grande dificuldade foi a existência de um grande volume de dados a visualizar pelos operadores, que não permitiu que avaliassem correctamente a extensão da interrupção e tomassem de imediato as acções correctivas que deveriam ser tomadas;
- em 2 e 3 de Julho de 1996 ocorreu uma interrupção de energia que afectou 2 milhões de pessoas e uma carga de 11,85 GW no oeste dos USA. O corte de energia eléctrica afectou de poucos minutos a algumas horas. O apagão iniciou-se quando uma de duas linhas em postes comuns de 345 kV tocou numa árvore e disparou. A actuação incorrecta da protecção provocou o disparo da linha sem defeito. Como estas duas linhas eram importantes para a transmissão de energia

produzida na central de Jim Brigger, provocaram o disparo de dois grupos, de quatro, da mesma central. Em consequência a frequência entra em declínio e a tensão entra em colapso em partes da rede. A rede separa-se em cinco partes minimizando a interrupção e o tempo de reposição do sistema. No dia 3 condições similares provocam o início de um colapso de tensão, contudo a intervenção do operador, deslastrando cargas, permitiu anular o colapso;

- em 10 de Agosto de 1996 ocorreu uma interrupção de energia que afectou 7,5 milhões de pessoas e uma carga de 28 GW no oeste dos USA. Houve zonas em que o corte de energia eléctrica foi apenas de poucos minutos, havendo contudo outras que foram afectadas durante 9 horas. O disparo de das maiores linhas de transmissão e a perda da central de McNary Dam resultou em oscilações no sistema que provocaram a separação do SEE oriental dos USA (ver secção 3.2), em 4 partes. Neste dia um tempo muito quente no sudoeste provocou uma grande subida das cargas. Por outro lado as excelentes condições hidrológicas no noroeste dos USA e no Canadá permitiram uma grande transferência de energia do norte para o sul. Esta transferência de energia sobrecarregou as linhas principais. Para agravar esta situação, é referido no relatório que no mesmo dia as temperaturas também estavam muito altas na parte oriental dos USA, o que provou a descida dos condutores de três linhas e o toque em árvores provocando o seu disparo.

Outra situação que aconteceu no verão de 1999 e que ocorreu na rede da empresa PJM foi o aumento das cargas acima do previsto. No dia 6 de Julho a carga foi de 51,6 GW, aproximadamente 5 GW acima da carga prevista para este dia. Para fazer face à subida de 10 % de carga a empresa PJM usa todos os procedimentos de emergência, como a importação de 5 GW das redes adjacentes e a descida de 5 % da tensão, mas não efectua outra operação de emergência disponível para estes casos, o deslastre de cargas. Esta situação arrasta-se durante vários dias obrigando a manter as medidas de emergência. A energia reactiva solicitada pelas cargas é superior à energia reactiva fornecida provocando a descida das tensões. Esta situação também é devido à necessidade de produzir em primeiro lugar energia activa, para fazer face aos consumos, e há existência de alguns bancos de condensadores fora de serviço.

Pela análise aos cinco maiores apagões dos USA do período de 1965 até 2002 verifica-se que todos têm cenários diferentes. Os eventos iniciais variam caso a caso. Geralmente é a conjugação dos eventos iniciais com um segundo conjunto de eventos desfavoráveis que provocaram a propagação da interrupção, como por exemplo a descoordenação do sistema de protecção ou o erro humano na avaliação do problema.

É referido no relatório que nos últimos anos, um dos factores que afectam directamente a fiabilidade do SEE americano, é a sua operação muito mais perto dos seus limites técnicos. Esta situação não permite ter uma adequada margem de segurança para fazer face a eventuais contingências.

Na tabela 3.6 apresentam-se os factores que foram considerados os mais importantes e que provocaram a alteração do paradigma do sector eléctrico americano.

Tabela 3.6 – Factores que se alteraram e que afectam a robustez do SEE americano

Condições anteriores	Condições actuais
Utilização de poucos recursos energéticos mas com grandes capacidades de exploração	Utilização de mais recursos energéticos mas com menos capacidades de exploração
Contratos a longo prazo	Contratos com um prazo curto
Transacções de energia eléctrica relativamente estáveis e previsíveis	Transacções de energia eléctrica relativamente variáveis e pouco previsíveis
Avaliação da robustez do sistema realizado a partir de uma base estável (os estados de operações eram mais previsíveis)	Avaliação da robustez do sistema realizado a partir de uma base variável (os estados de operações são menos previsíveis)
Os intervenientes na rede eram em menor número e conhecidos	Mais intervenientes a realizarem transacções, alguns com pouca experiência
Grande capacidade de transmissão com grande margem de segurança	Grande utilização da transmissão com a operação do sistema a realizar-se junto do limite de segurança
Competição limitado, com grande incentivo para realizar os investimentos necessários para aumentar o nível de segurança de operação do sistema	Pouca incentivo para se realizar investimentos necessários para aumentar a segurança de operação do sistema
As regras de mercado e de segurança eram realizadas conjuntamente	As regras de mercado e de segurança são realizadas separadamente

Nos últimos anos, a diminuição de recursos energéticos tradicionais e a perspectiva do seu esgotamento a médio prazo, em que o petróleo é o primeiro que se encontra nessa situação, conjugado mais recentemente com o aumento da procura pelas economias asiáticas em acelerado crescimento, leva por um lado, a uma situação muito preocupante em termos económicos e a um esgotamento precoce, por outro lado, cria um grande incentivo à procura de novas fontes energéticas. Todo este contexto não se pode dissociar dos problemas ambientais criados nas últimas décadas, principalmente devido à libertação para a atmosfera de gases que provocam o efeito de estufa. A produção de energia eléctrica contribui pela queima de combustíveis fósseis, nas centrais de produção, para esse efeito. Por estas razões, a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias limpas para a utilização de energias renováveis de preferência endógenas aumentou na última década, muito em especial na Comunidade Europeia (CE). A CE procura desta forma cumprir os

compromissos assumidos pela rectificação do Protocolo de Quioto, como também, diminuir a sua dependência energética. A CE necessita de diminuir as importações de energias fósseis, que nas próximas décadas tende a agravar-se devido ao esgotamento progressivo das suas fontes próprias e do aumento do consumo de energia.

3.3 – O SEE Americano

O SEE global americano, “*the grid*”, tem uma dimensão continental, sendo constituído por 320 000 km de linhas de transmissão de energia eléctrica operando com níveis de tensão de 230 kV ou superior e uma capacidade de produção de energia eléctrica de 950 GW. Nos USA operam 3 500 empresas de distribuição que fornecem energia eléctrica a cerca de 100 milhões de clientes, que correspondem a uma população de 283 milhões de pessoas.

Na prática o sistema global, “*the grid*”, está dividido em três SEE totalmente independentes e distintos com pequenas interligações entre eles, que se podem desprezar face à dimensão da potência produzida ou consumida em cada um deles. Como se pode ver na figura 3.3, o primeiro SEE é o Oriental, *Eastern Interconnection*, correspondendo cerca de 2/3 do território dos USA, constituído pelos estados orientais e pela parte oriental do Canadá. O segundo é o SEE Ocidental, *Western Interconnection*, compreendendo cerca de 1/3 do território dos USA, estados ocidentais, duas províncias do Canadá e uma parte da California do Norte. O terceiro SEE, *ERCOT Interconnection*, corresponde ao estado do Texas.

No apagão do dia 14 de Agosto de 2003, cerca de 10 % das cargas, do SEE Oriental, foram afectadas, mas os outros dois SEE não sofreram qualquer interrupção, devido à sua total independência eléctrica.

Para percebermos a maneira como são geridos estes três SEE será realizada uma análise aos seus intervenientes.

NERC

A NERC - North American Electric Reliability Council¹ é uma entidade não governamental cuja missão é coordenar o sector eléctrico para o tornar fiável, adequado e seguro. Para conseguir realizar esta missão, a intervenção da NERC vai desde a definição de standards para as operações de planeamento e reposição, monitorizando também o seu cumprimento. Avalia e analisa a performance do sector eléctrico. Coordena os conselhos regionais de fiabilidade e outras organizações. Coordena as protecções mais críticas do SEE e proporciona preparação e treino para os recursos humanos, entre outras competências.

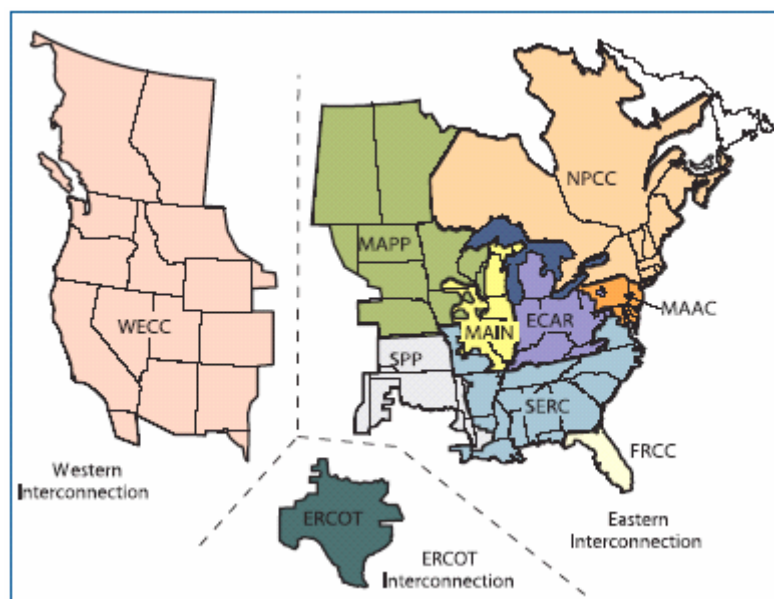


Figura 3.3 – Os três SEE norte-americanos que constituem “the grid”

NERC regionais

O território americano está dividido em dez conselhos regionais da NERC que são mostrados na figura 3.4. A cada conselho regional da NERC pertencem as entidades ligadas ao sector eléctrico: agências federais de energia; empresas de distribuição privadas ou governamentais; cooperativas rurais de electricidade; produtores independentes; empresas de venda de energia e clientes finais.

O apagão do dia 14 de Agosto afectou 3 NERC regionais: - ECAR (East Central Area Reliability Coordination Agreement), MAAC (Mid-Atlantic Area Council) e NPCC (Northeast Power Coordinating Council).

¹ A Nerc foi fundada em 1968 após o apagão de 1965, analisado na secção precedente.

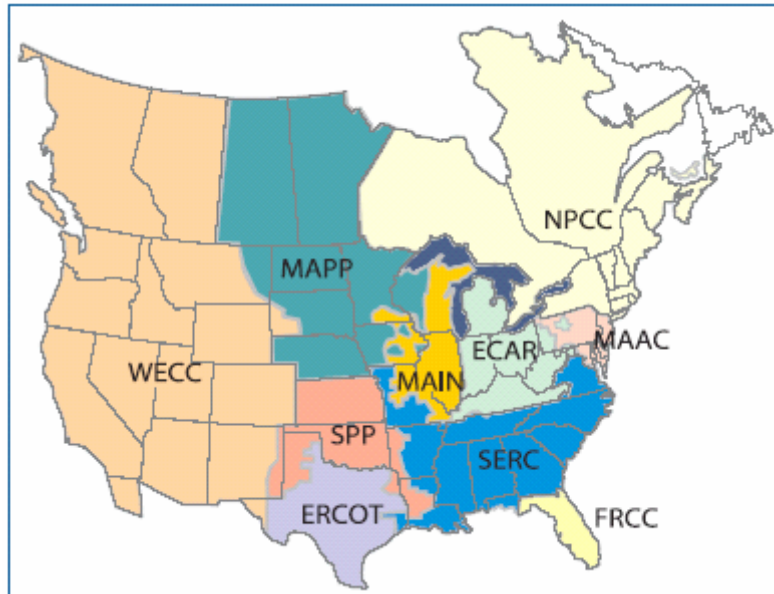


Figura 3.4 – Conselhos regionais da NERC

Control Areas

As *Control Areas* são as primeiras entidades operacionais a estarem sujeitas às regras estipuladas pelos conselhos regionais da NERC para manter a fiabilidade do sistema e na reposição em caso de incidente. Os *Independent System Operator* (ISOs) ou *Regional Transmission Organization* (RTOs) são entidades do tipo “*Control Areas*” onde os seus centros de despacho fazem a contínua monitorização, em tempo real, das suas redes, quanto à produção, cargas e interligações com as outras *control areas* vizinhas. Na figura 3.5 apresentam-se as 140 *Control Areas* do SEE global dos USA.

A mais importante responsabilidade das *Control Areas* é a de cumprirem o critério “**N-1**” cumprindo a determinação NERC 2.A:

“Todas as *Control Areas* operarão para que como resultado da mais severa contingência simples não ocorra separação incontrolável da rede ou saídas de serviço em cascata.”

Cumprindo outras determinações da NERC é de sua competência, e em caso de situação de emergência, tomarem prontamente medidas para corrigir situações perigosas para a rede. Dentro dessas situações de emergência está o estabelecimento de um programa de deslastre automático de cargas para aplicarem, caso ocorra um abaixamento da frequência ou de tensão de uma forma acentuada.

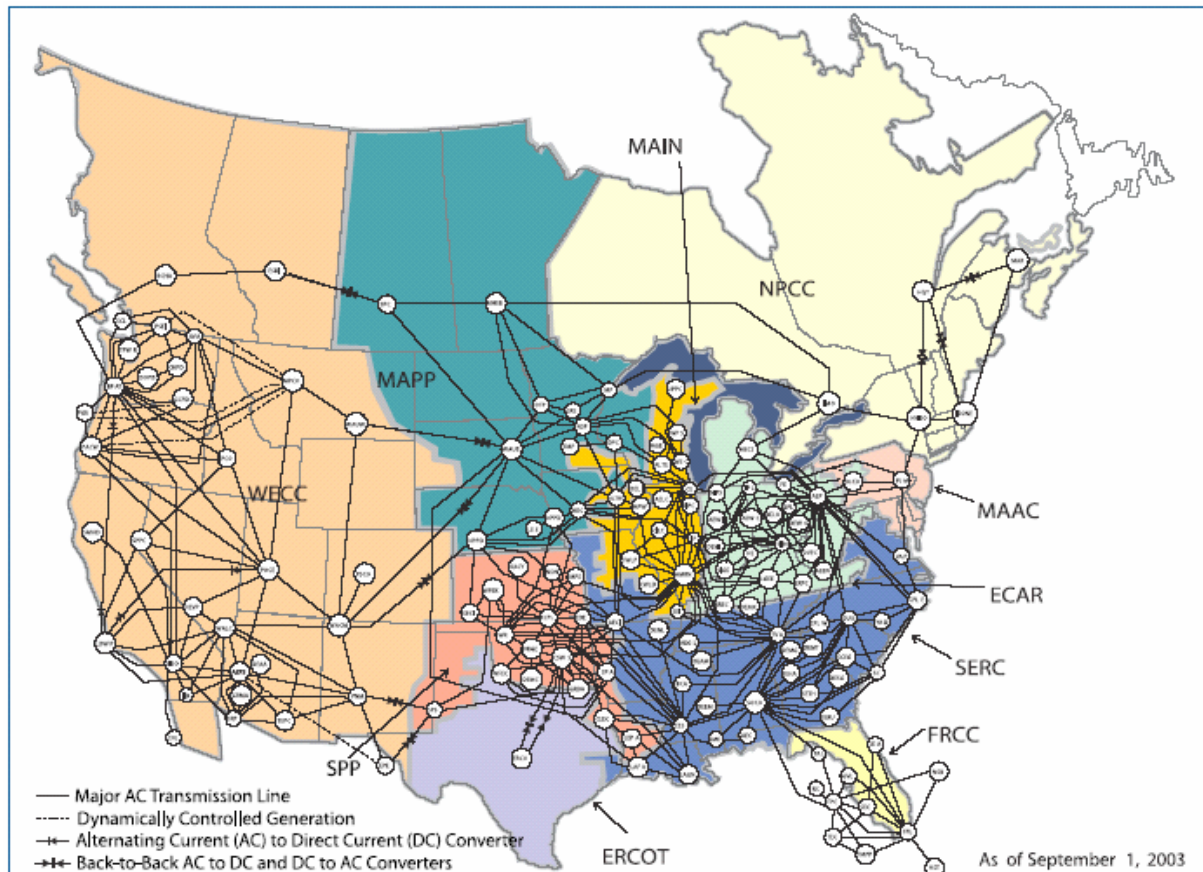


Figura 3.5 – Regiões da NERC e Control Areas

Tradicionalmente, a área de intervenção, das *Control Areas*, são definidas pelas fronteiras das empresas que operam verticalmente neste sector, sendo por isso sua propriedade a produção, as redes de transmissão e a distribuição de energia eléctrica. Enquanto que este modelo tradicional se mantém em algumas áreas, noutras áreas dos USA tem havido uma significativa reestruturação das funções de operação nas redes e também algumas consolidações de *Control Areas* em entidades regionais de operação.

A reestruturação deste sector, tem levado á separação das actividades da produção, transmissão e distribuição de energia eléctrica. Esta reestruturação permitiu o aparecimento de entidades independentes ISOs e RTOs. Estas entidades têm como primeira função a de gerir em tempo real o seu sistema e realizar as previsões para o dia seguinte da operação grossista do mercado de energia na sua área. Estas entidades não podem ser proprietários de redes de transmissão, mas podem operar ou dirigir a operação de redes que sejam propriedade dos seus membros. Podem também exercer as funções das *Control Areas* e podem ser *NERC reliability*.

Cinco ISOs/RTOs pertenciam à área afectada pelo apagão:

- MISO (Midwest Independent System Operator);

- PJM (PJM Interconnection);
- NYISO Operator (New York Independent System);
- ISO-NE (New England Independent System Operator);
- IMO (Ontario Independent Market Operator).

Reliability Coordinators

A NERC para coordenar, em tempo real, operações de reposição em caso de incidente tem correntemente dezoito centros *Reliability Coordinators* (RC), Coordenadores de Reposição, como mostra a figura 3.6.

Os RC, em caso de incidente e em tempo real, coordenam as operações de emergência e preparam a avaliação da reposição em uma ou mais *Control Areas*. Estas entidades podem ser também ISOs ou RTOs.

A entidade MISO é ao mesmo tempo uma ISO/RTO e RC. Como RC tem à sua responsabilidade a coordenação de reposição de 37 *Control Areas*, sendo este aspecto apontado pela NERC como um ponto fraco no ponto de vista de reposição e fraca autoridade dentro da sua área de controlo que pertence aos seus membros. Por outro lado outro RC envolvido, PJM, tem só à sua responsabilidade a coordenação de reposição de 9 *Control Areas*, o que permite exercer as suas responsabilidades da forma correcta do ponto de vista da NERC.

As entidades envolvidas nos primeiros eventos

Nos eventos iniciais do apagão de 14 de Agosto estão envolvidas duas *Control Areas*: *FirstEnergy* (FE) e *American Electric Power* (AEP) e os seus respectivos coordenadores de reposição MISO e PJM.

A FE é constituída por sete empresas de distribuição, onde quatro pertencem à região NERC ECAR e têm como coordenador de reposição a MISO.

A AEP opera na área de Ohio e a sul da FE, sendo também um operador da rede de transmissão de energia eléctrica.

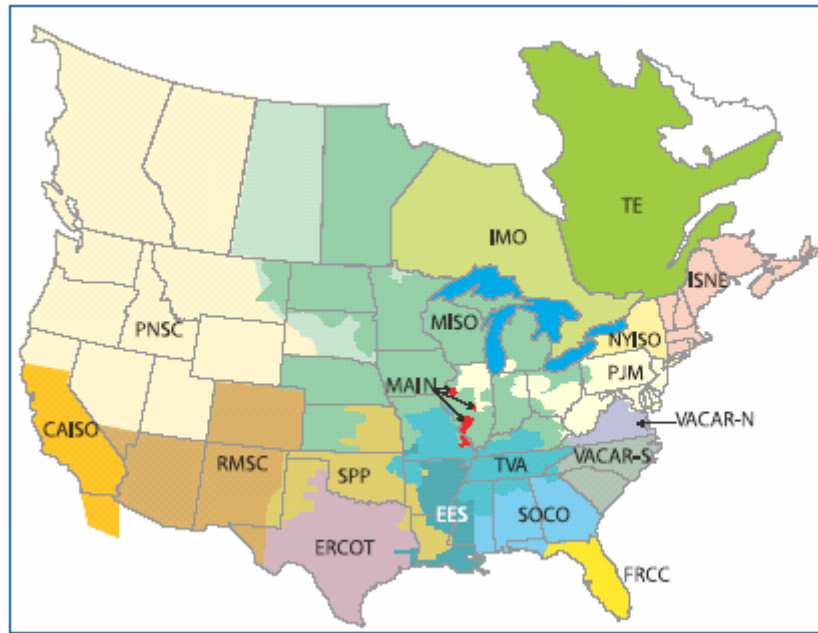


Figura 3.6 – Reliability Coordinators da NERC

3.4 – O contexto antes do apagão

O dia 14 de Agosto foi um dia quente, dentro do que é normal para a época no nordeste dos USA e da parte oriental do Canadá. Devido a ser mais um dia quente, após um conjunto de vários dias de calor persistente de verão com as temperaturas a atingirem 31°, a situação não era favorável do ponto de vista de cargas. Nesse dia os consumos tinham aumentado significativamente. A carga correspondia ao maior consumo do ano de 2003, mas não igualava as pontas máximas absolutas. As cargas eléctricas tinham subido 20%, na área da FE, passando de 10 095 MW para 12 165 MW.

Os consumos de energia para climatização nunca sobem no primeiro dia quente ou no primeiro dia frio, mas sim ao fim de alguns dias, quando os edifícios já perderam ou ganharam o calor que tinham armazenado, sendo esta perda ou ganho dependente da maior ou menor inércia térmica. Por isso numa vaga de calor ou frio só após alguns dias é que os consumos aumentam significativamente. Foi uma situação equivalente a esta que aconteceu no dia 14 de Agosto nos USA, em que o aumento do consumo foi relacionado com o trabalho contínuo do ar condicionado. O ar condicionado é caracterizado por ter um factor de potência muito baixo devido à utilização de motores de indução, o que provoca um consumo anormal de energia reactiva.

No mês de Julho de 2005 uma vaga de calor, atingindo as temperaturas valores de 45° estavam a criar na zona sul dos USA consumos muito acima do normal. Os sistemas eléctricos não estão preparados para este aumento exagerado e anormal dos consumos, provocando muitas vezes situações muito difíceis de abastecimento de energia eléctrica. Como actuação de emergência, e caso seja necessário, para evitar o colapso de tensão do SEE, deslastram-se cargas.

No dia do apagão, cinco geradores estavam indisponíveis totalizando 3 178 MW e 1 656 MVar (ver tabela 3.7). No próprio dia do apagão tinha saído por avaria um gerador, Conesville 5. No dia anterior, dois geradores tinham saído por avaria. Cinco dias antes, um gerador tinha saído por saída de serviço planeada. Um gerador de uma central nuclear estava indisponível desde o ano anterior.

Estas indisponibilidades criavam limitações de produção de energia reactiva, pois todos estes cinco geradores fornecem energia activa e reactiva directamente para as mesmas áreas, Cleveland, Toledo e Detroit. Mesmo assim, com todas estas indisponibilidades, o planeamento de cargas do ISO/RTO e RC MISO, previa para este dia e para este sistema regional uma operação segura.

Na manhã do mesmo dia, cinco bancos de condensadores, na área de Cleveland-Akron, entre eles dois numa subestação de 138 kV, são retirados de serviço para inspecção, contrariando a necessidade de produzir mais reactiva na sua área de influência. Estas indisponibilidades contrariam a prática normal, pois normalmente são só realizadas fora dos períodos onde as cargas atingem valores altos. A partir destas indisponibilidades, foi definida como “Causa 1 – Compreensão inadequada do sistema”, a indisponibilidade de recursos de produção de energia reactiva, que a FE nunca conseguiu identificar como críticos nem tão pouco avisou o centro coordenador NERC da realização das mesmas indisponibilidades.

A produção de energia reactiva é muito importante para manter as tensões dentro dos níveis normais, sendo os geradores os principais produtores. Por isso a conjugação de factores com o mesmo sentido, como a indisponibilidade dos cinco geradores e as cargas estarem a assumir valores de ponta anual, com a componente reactiva a assumir valores muito altos, estava a criar uma situação grave de tensões baixas. A situação das tensões baixas ainda se agravou mais com a indisponibilidade dos cinco bancos de condensadores. Os bancos de condensadores, a seguir aos geradores, são muito importante na produção de energia reactiva.

Tabela 3.7 – Geradores indisponíveis no dia 14 de Agosto

Generator	Rating		Reason for Outage
Davis-Besse Nuclear Unit	934 MW	481 Mvar	Prolonged NRC-ordered outage beginning on 3/22/02
Eastlake Unit 4	267 MW	150 Mvar	Forced outage on 8/13/03
Monroe Unit 1	780 MW	420 Mvar	Planned outage, taken out of service on 8/8/03
Cook Nuclear Unit 2	1,060 MW	460 Mvar	Outage began on 8/13/03
Conesville 5	400 MW	145 Mvar	Tripped at 12:05 on August 14 due to fan trip and high boiler drum pressure while returning a day early from a planned outage.

Esta situação era preocupante mas sustentável, caso não houvesse saídas de linhas que pioram ainda mais as tensões:

- às 12.02 horas, a linha de transmissão Stuart-Atlanta, operada pela DPL e monitorizada pelo CR PJM, dispara por contacto com árvore, permanecendo fora de serviço o resto da tarde. Numa análise posterior, realizada pelo grupo de trabalho da investigação, mostrou que também este disparo não provocou o subsequente evento que leva ao apagão. Contudo, como esta linha não está na área de competência do CR MISO, não monitoriza o seu estado e desconhece que está fora de serviço. Esta situação leva a que haja um erro de dados do estimador de estado do CR MISO;
- às 12.08 horas locais três linhas de transmissão de 345, 230 e 138 kV iniciam uma serie de disparos permanecendo fora de serviço ao longo do apagão. A perda destas linhas provocou um abaixamento significativo das tensões na área da empresa Cinergy. Cinergy fez alterações na produção e a MISO implementa procedimentos de controlo de fluxos no sistema de transmissão centro-sul de Indiana. A modelação do sistema pelo grupo de trabalho da investigação mostra que a perda destas linhas são independentes das causas que levaram ao apagão.

O desconhecimento pelo gestor da rede local CR MISO da saída de uma linha é muito grave na medida em que cria limitações na sua análise. Este problema denota a falta de um coordenador que veja a rede de uma forma mais alargada e não por áreas de competência.

Às 12.15 horas problemas no estimador de estado do CR MISO inviabilizam o bom funcionamento da aplicação de análise em tempo real de contingência, provocando que estivesse efectivamente fora de serviço até às 16.04 horas. Esta situação não permitiu que o CR MISO tivesse conhecimento de disparos de linhas, que entretanto ocorreram, não havendo por isso uma actuação adequada às situações que apareceram posteriormente. Esta situação confirma a tese da falha de um coordenador que também poderia ser um *backup* às CR.

Às 13.31 horas locais saiu de serviço o grupo 5 da central de Eastlake. Como se pode ver na figura 3.7, a causa para o disparo foi a produção acima do limite da capacidade do grupo em termos de energia reactiva. O operador tinha sucessivamente aumentado a produção de energia reactiva, por pedido da FE para tentar melhorar as tensões na sua área, não respeitando o limite máximo da corrente de excitação.

Com a central nuclear de Davis-Besse e o grupo 4 da central Eastlake fora de serviço, ver tabela 3.7, consideradas de importância vital, âncoras para a produção de energia activa e reactiva, a perda do grupo 5 da central de Eastlake piorou a situação, ou seja as tensões ainda baixaram mais. Este grupo era a maior fonte de energia reactiva que estava a fornecer para a área de Cleveland. Mesmo assim, estudos posteriores no âmbito da investigação da *Task Force*, não consideraram que a perda deste grupo colocasse a rede num estado de inviabilização da reposição, ou seja, o sistema ainda era capaz de resistir a outra contingência. Contudo, provocou o aumento da importação de energia activa e reactiva, aumentando os problemas de tensão e reduzindo a margem de operação do sistema.

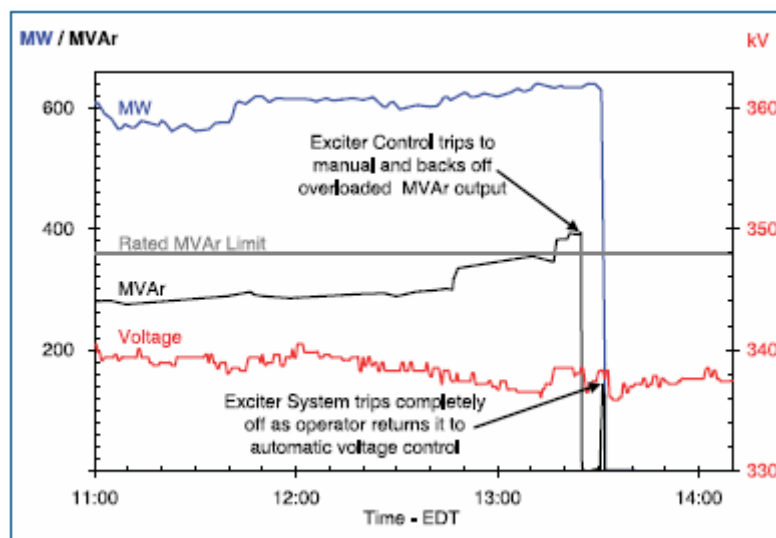


Figura 3.7 – Produção de energia activa e reactiva do grupo 5 da central de Eastlake no dia 14 de Agosto

Por volta das 14.14 horas, a sala de controlo da FE perde a função de alarme que proporcionava indicações visuais e alarme sonoro, caso houvesse activação de patamares de alarme ou mudança de estado dos equipamentos. Um pouco depois perde o sistema EMS. Sem as funcionalidades EMS e sem alarmes, o operador desconhece que as condições na sua rede estão a degradar-se. Estando já a trabalhar em condições precárias, as condições pioram quando às 14.54 o computador *back-up* também se avaria.

Uma das causas sugeridas, para o problema das tensões baixas no nordeste de Ohio e o subsequente apagão, seria devido às transferências de energia eléctrica terem atingido, nesse dia, valores muito alto entre regiões. Uma análise realizada posteriormente mostrou que esta situação estava dentro das capacidades de importação da zona. Na figura 3.8 apresentam-se as produções, cargas e transferências entre regiões, às 15.05 horas, do dia 14 de Agosto.

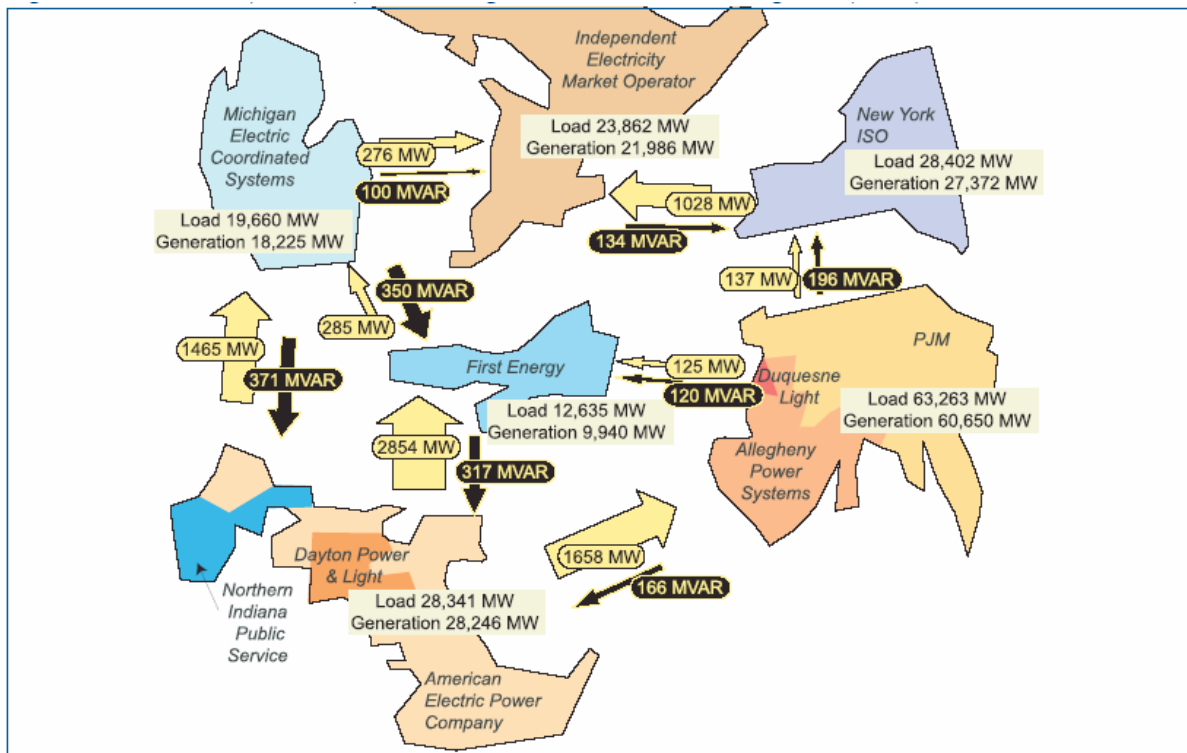


Figura 3.8 – Produção, cargas e transferências entre regiões às 15.05 horas do dia 14 de Agosto

Com a rede a avançar rapidamente para uma situação de colapso pela sucessiva catadupa de contingências que piora sucessivamente os níveis de tensão, a fase seguinte corresponde aos eventos do pré-colapso da rede:

- às 15.02 horas a linha de 345 kV Stuart-Atlanta da *Control Area* Dayton Power and Light dispara por contacto com uma árvore, causando um curto-circuito à terra. Investigações posteriores mostraram que este disparo provocou um significativo efeito nos fluxos de potência e nas tensões na área da FE. Não tiveram contudo um papel determinante para o apagão que se veio a verificar mais tarde. A única razão porque esta linha é importante para o apagão é que contribui para a precarização do

sistema da FE, que o CR MISO não estava a conseguir identificar devido aos problemas com o estimador de estado, já referidas anteriormente e iniciadas às 12.15 horas;

- às 15.05 horas a linha de 345 kV Harding-Chamberlin dispara devido a um contacto entre a linha e uma árvore. Esta linha dispara com 44 % da carga máxima. A perda desta linha obrigou à passagem da carga para as restantes três linhas de 345 kV, sendo a linha Hanna-Juniper a que mais aumentou. Outra consequência foi causar um aumento de fluxo de energia no sistema de 138 kV, por ser um caminho alternativo ao sistema de 345 kV;
- às 15.32 horas a linha de 345 kV Hanna-Juniper dispara devido a um contacto entre a linha e uma árvore. Esta linha disparou com 1200 MW, correspondendo a 88 % da carga máxima. A perda desta linha sobrecarrega mais as outras duas linhas de 345 kV, que ainda se encontram ao serviço, e aumenta ainda mais a sobrecarga do escalão de 138 kV;
- às 15.41 horas a linha de 345 kV Star-South Canton dispara devido a um contacto entre a linha e uma árvore. Anteriormente tinha disparado três vezes e religado. Esta linha dispara com 93 % da carga máxima. Depois deste disparo, as cargas sobem nos únicos caminhos que restam para transportar energia do sul para a área de Cleveland, as linhas de 138 kV e a linha de 345 kV Sammis-Star;
- os disparos das três linhas de 345 kV, às 15.05, 15.32 e 15.41 horas, causaram a descida das tensões e o aumento dos fluxos do sistema de 138 kV. Como mostra a figura 3.9 as linhas do escalão 138 kV entraram em sobrecarga ao fornecer um caminho alternativo ao sistema de 345 kV, que entretando se tinha fragilizado devido aos disparos já descritos;
- entre as 15.39 e as 15.58 horas sete linhas de 138 kV e um transformador 345/138 kV disparam por sobrecarga, contacto com linhas de distribuição, falhas à terra ou outras falhas não esclarecidas;
- às 15.59 horas a abertura do disjuntor do barramento West Akron provoca a abertura de cinco linhas de 138 kV. Esta abertura é motivada pela pressão baixa do circuito de ar comprimido dos disjuntores. O elevado número de manobras de disjuntores, em pouco tempo, não permite que haja uma reposição da pressão para o seu valor normal, provocando o colapso deste sistema de apoio com a consequente saída de serviço da subestação;

- entre as 16.00 e as 16.08 horas saíram de serviço mais quatro linhas de 138 kV por razões não esclarecidas;
- às 16.06 horas a linha 345 kV Sammis-Star saiu de serviço por sobrecarga. Esta linha era a única que restava do sistema de 345 kV.

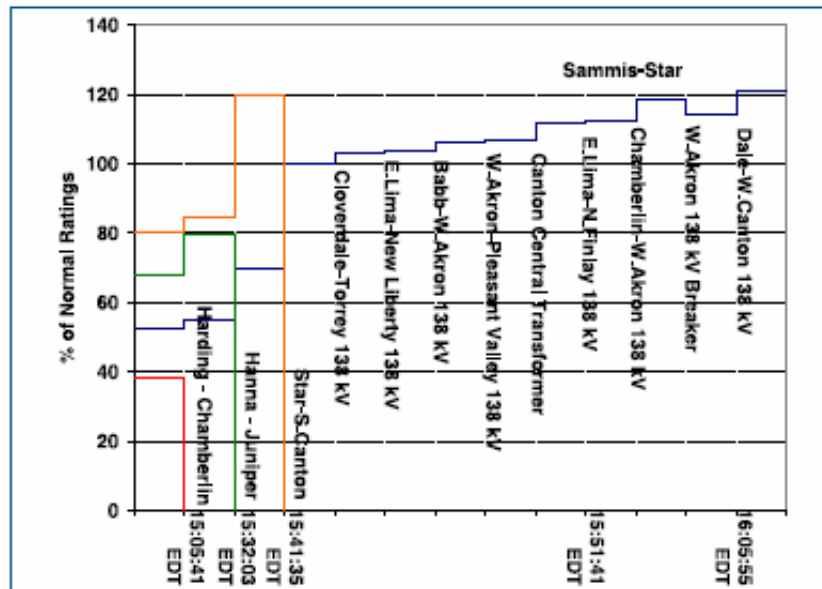


Figura 3.9 – Efeitos cumulativos dos disparos das linhas de 345 kV nas linhas de 138 kV

Com a sucessiva saída de serviço de linhas e subestações, o grupo de trabalho concluiu que o sistema eléctrico estava numa situação de pré-colapso de tensão. O mesmo grupo de trabalho chegou à conclusão que se a FE tivesse deslastrado 1 500 MW na zona de Cleveland-Akron, antes da saída de serviço da linha Sammis-Star por sobrecarga, teria evitado o apagão e as tensões teriam subido de 90,8 % para 95,9 %.

Como mostra a figura 3.10, às 16.00 horas, as reservas de produção de energia reactiva no sistema FE eram praticamente nulas o que colocava esta rede numa situação extremamente difícil do ponto de vista de tensões. Esta rede estava nesta altura numa situação de pré-colapso por tensões baixas.

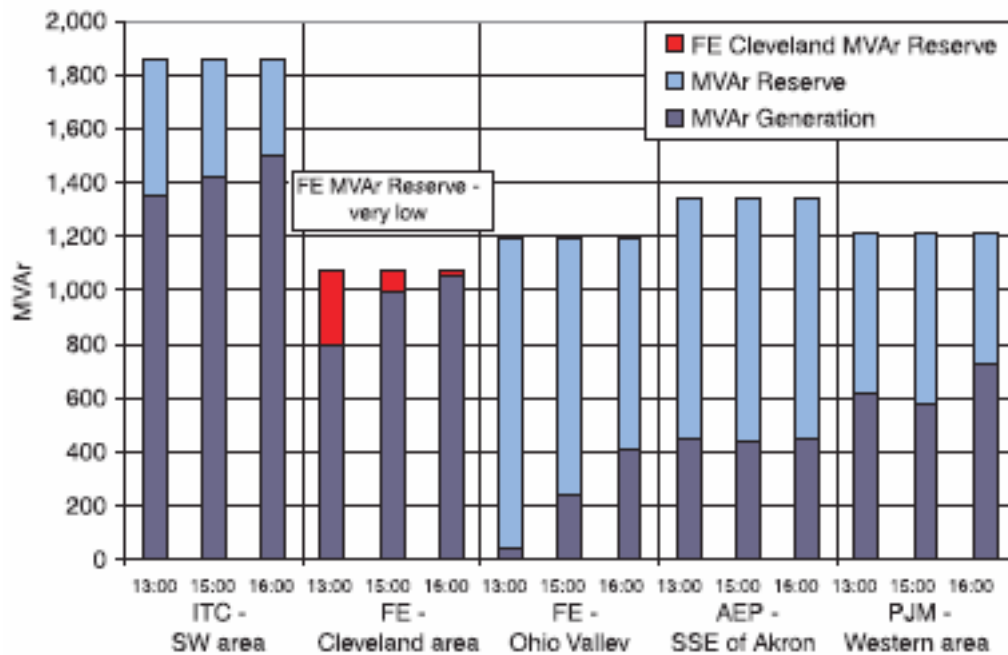


Figura 3.10 – Produção e reservas de energia reactiva nas áreas de Ohio e adjacentes

3.5 – O apagão

As sucessivas saídas de serviço de linhas de 345 kV, que a partir das 15.05 horas provocaram progressivamente a sobrecarga das restantes linhas do mesmo escalão de tensão ou do sistema de 138 kV, culminou com a saída da ultima linha de 345 kV Sammis-Star às 16.06, provocando o colapso do sistema de transmissão da FE. Este último evento foi considerado o que provocou o início do apagão com a saída de serviço em cascata de linhas e geradores.

Mesmo estando o sistema numa situação de pré-colapso de tensão, não foi considerado que o apagão tenha sido devido às tensões baixas mas sim devido a um colapso por frequência originadas por saída de linhas e geradores.

Como se pode ver na figura 3.11, a saída de serviço de linhas MAT e AT e geradores, em cascata, iniciou-se de uma forma lenta, mas rapidamente se transformou numa situação incontrolável. A partir das 16.09 horas, a taxa de saída de serviço aumenta

exponencialmente. Às 16.12 horas estavam fora de serviço 508 geradores de 265 centrais, ou seja, bastaram apenas 3 minutos para o apagão estar concluído.

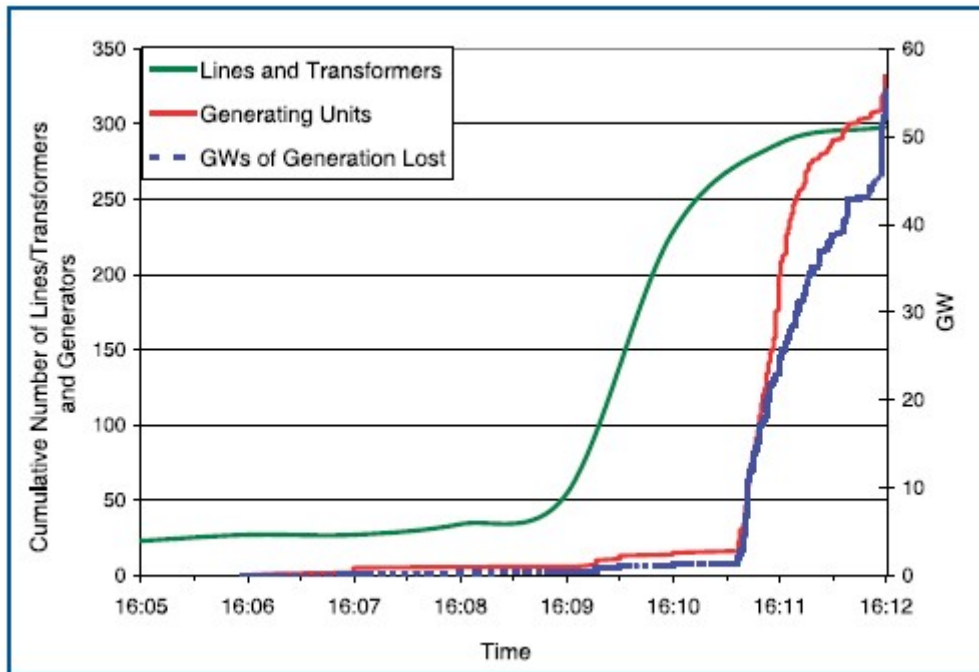


Figura 3.11 – Taxas de saídas de serviço de linhas e geradores durante o apagão

A conjugação de muitas situações desfavoráveis levaram progressivamente o sistema a avançar para uma situação que ainda poderia ser corrigida por actuação humana. A partir de um ponto limite as acções correctivas deixam de ser possíveis. Após o seu início, a saída em cascata de serviço de linhas e geradores não é possível interromper por intervenção humana. A saída em cascata é um fenómeno dinâmico que tem origem na falta de margem do sistema para as contingências que lhe dão origem.

Deslastre de cargas

O sistema eléctrico Norte-americano opera com uma frequência de 60 ciclos por segundo (HZ). Em cada momento o valor da frequência reflecte o balanço entre as cargas e a produção de energia. Isto significa que se, a qualquer momento, o valor das cargas for superior à produção de energia eléctrica, a frequência desce para valores inferiores a 60 Hz. Caso a produção seja superior a frequência sobe para valores superiores. Como mostra a figura 3.12, se a frequência descer abaixo de 59,3 Hz, automaticamente inicia-se o deslastre de cargas, procurando-se desta forma que o equilíbrio se restabeleça entre cargas e

produção. Entre o valor mínimo de deslastre e o valor máximo, que corresponde ao valor de disparo dos geradores por frequência baixa, há vários níveis de deslastre. A cada nível de deslastre está agrupado um conjunto de cargas a deslastrar. Isto significa que se após a saída do primeiro nível de deslastre, e caso se restabeleça o equilíbrio entre as cargas e produção, pára o deslastre de cargas.

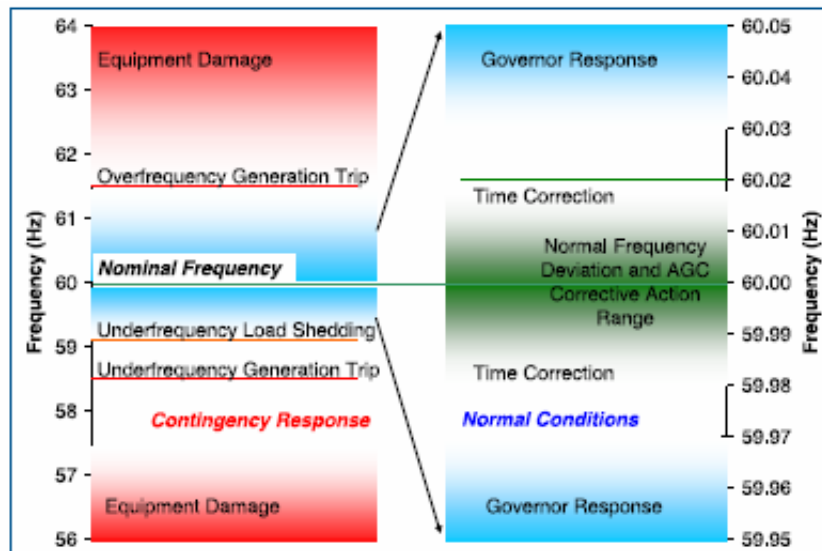


Figura 3.12 – Intervalos de variação da frequência

Na tarde do dia 14 de Agosto a função automática UFLS (automatic under-frequency load-shedding) activou os seguintes deslastres:

- a partir das 16.10 horas 1 883 MVA em Ohio;
- a partir das 16.10 horas 10 648 MW, em vários níveis, em Nova York;
- a partir das 16.10 horas 1 324 MW, em 3 níveis, nordeste de New Jersey realizado pela PJM;
- a partir das 16.10 horas 7 800 MW, em 2 níveis, em Ontario;
- em New England no total 1 098 MW;
- em Michigan no total 2 835 MW.

As cargas deslastradas corresponderam a 41% das cargas afectadas pelo apagão. A maioria dos deslastres foram efectuados numa altura em que já estava muito avançado o

processo de saídas de serviço em cascata, ver figura 3.11, o que não permitiu a reposição do equilíbrio entre cargas e produção.

Com a saída de serviço de linhas de interligavam várias áreas do SEE, houve partes do sistema onde foi possível voltar a existir o equilíbrio entre a produção e a carga, ficando em rede isolada.

3.6 – Causas que provocaram o apagão e recomendações para evitar ou minimizar futuros apagões

O grupo de trabalho dividiu em quatro grupos as causas que provocaram o apagão.

Grupo 1 – A FE e ECAR falharam na avaliação e compreensão das fragilidades do sistema da FE, particularmente quanto à instabilidade de tensão e vulnerabilidade da área de Cleveland-Akron. A FE não realizou as operações de emergência disponíveis para resolver os problemas das tensões baixas. As razões apontadas neste grupo foram: a falta de monitorização e gestão das reservas de produção de energia reactiva para várias condições de contingências; o não cumprimento do período de 30 minutos para reajustar o sistema para estar preparado para uma nova contingência; a falta de um critério de tensão correcto; a falta de um programa de deslastre automático por tensões baixas.

Como vimos na secção 3.3, o deslastre de 1 500 MW, na zona de Cleveland-Akron seria suficiente, antes da saída de serviço da linha Sammis-Star por sobrecarga, para que as tensões pudessem subir de 90,8 % para 95,9 % e evitar os disparos posteriores por sobrecarga que foram determinantes para o apagão se iniciar. Outra razão que levou à existência de tensões baixas, foi o critério de tensão adoptado na FE, ver tabela 3.8.

O grupo de trabalho conclui que a adopção pela FE, para a área de Cleveland-Akron, como nível mínimo da tensão de 90% e alarme em 92% para a operação do sistema, levava a que caso ocorresse uma contingência simples as tensões descessem abaixo dos 90 %. Este critério não foi o mais adequado para uma operação segura do sistema. O mesmo grupo propôs a subida de 90 % para 95 %.

Tabela 3.8 – Comparação dos critérios de tensão (percentagem)

345 kV/138 kV	FE	PJM	AEP	METC ^a	ITC ^b	MISO	IMO ^c
High	105	105	105	105	105	105	110
Normal Low	90	95	95	97	95	95	98
Emergency/Post N-1 Low	90	92	90 ^d		87		94
Maximum N-1 deviation	5 ^e			5			10

^aApplies to 138 kV only. 345 kV not specified.

^bApplies to 345 kV only. Min-max normal voltage for 120 kV and 230 kV is 93-105%.

^c500 kV.

^d92% for 138 kV.

^e10% for 138 kV.

Grupo 2 – A FE não reconheceu nem compreendeu a deterioração das condições do seu sistema. Como principais razões são apontadas: a inadequação das monitorizações de equipamento, peça fundamental para alertar o operador, no caso de haver importantes desvios das condições de operação; não usou o estimador de estado e a ferramenta informática de análise de contingências na avaliação das condições do sistema.

Grupo 3 – A FE falhou na limpeza das faixas das linhas de transmissão. O contacto de condutores em árvores provocou a saída de serviço de três linhas de 345 kV e algumas linhas de 138kV.

Grupo 4 – Falhas no diagnóstico da situação das interligações devido à inadequada visibilidade à escala regional do sistema eléctrico de energia global. As principais razões são: a CR MISO não ter notificado outras CR da gravidade dos problemas que estavam a acontecer no sistema que estava a coordenar; a CR MISO não usou dados em tempo real de suporte a operações em tempo real; as CS MISO e PJM não terem procedimentos, entre elas, que permitissem coordenar acções para casos de contingências junto da fronteira comum das suas redes.

O grupo de trabalho que realizou o inquérito ao apagão ocorrido no dia 14 de Agosto de 2003 conclui que houve várias causas directas e factores que contibuíram para o apagão. A partir destas conclusões foram realizadas 46 recomendações, como por exemplo, entre outras:

- os standards da fiabilidade passarão a ser obrigatórios, com penalizações caso não sejam cumpridos;
- os standards da fiabilidade deverão ser desenvolvidos por uma *international electric reliability organization* (ERO);
- os standards da fiabilidade deverão ser flexíveis para permitir diferenças regionais desde que não leve a situações de menor performance da fiabilidade;
- corrigir as causas directas do apagão, como por exemplo a definição de um standard para a realização da limpeza das faixas das linhas eléctricas;
- o aumento de auditorias na área da fiabilidade;
- melhorar o treino dos operadores e coordenadores de fiabilidade.

3.7 – Conclusões

No dia 14 de Agosto de 2003 ocorreu um apagão nos USA e Canadá que devido à sua dimensão, impacto económico e social, se considerou um caso de estudo. Pretendeu-se desta forma complementar o estudo teórico relativo à estabilidade de tensão com a análise de um caso prático.

Este estudo tem particular interesse, pois na origem do apagão estiveram problemas de tensões baixas provocadas por incapacidade de produção de energia reactiva. Por isso, este estudo está inserido na problemática tratada nesta dissertação, a estabilidade de tensão das redes eléctricas.

O dia 14 de Agosto foi um dia muito complicado do ponto de vista da exploração da rede da FE. As cargas, devido às temperaturas muito altas, estavam a atingir a ponta máxima do ano, com consumos anormais de energia reactiva. Foi considerado que esta subida de cargas estava relacionada com o trabalho em continuo do ar condicionado. Por outro lado, a saída de serviço planeada ou por avaria de geradores, estava a criar uma situação de incapacidade de produção de energia reactiva o que provocava tensões anormalmente baixas. Neste contexto desfavorável do ponto de vista de tensões, a FE retira 5 bancos de condensadores para inspecção, que eram importantes para a produção de energia reactiva.

Na tentativa de melhorar as tensões, aumentam a produção de energia reactiva do grupo 5 da central Eastlake, mas o valor de corrente de excitação ultrapassa o valor máximo. Este erro provocou a saída de serviço do grupo, piorando ainda mais as tensões.

A situação piorou ainda mais, aproximando-se o sistema da FE de um pré-colapso por tensão, quando progressivamente saíram de serviço várias linhas de 345 kV. Com a progressiva saída de serviço das linhas de 345 kV, o sistema de 138 kV é a alternativa eléctrica para alimentar as cargas, mas rapidamente entra em sobrecarga. Em 30 minutos saíram de serviço 16 linhas de 138 kV.

O colapso do sistema de transmissão de 346 kV ocorre com a saída da última linha deste nível de tensão, às 16.06 horas. Este evento foi considerado o que provocou o início do apagão com a saída de serviço em cascata de linhas e geradores sem que fosse possível a sua paragem.

Como foi analisado, até ao evento que provocou o apagão por colapso por frequência, aconteceram imensos eventos que fragilizaram progressivamente o sistema de energia da FE, levando-o a um estado de pré-colapso de tensão. A FE nunca conseguiu evitar o agravamento desta situação, tendo mesmo várias avarias na sua sala de comando que inviabilizaram a avaliação em tempo real da situação no período mais crítico.

O grupo de trabalho concluiu que este apagão poderia ter sido evitado, caso a FE tivesse em serviço um programa automático de deslastes para cortar cerca de 1500 MW de carga, evitando o colapso do sistema de 345 kV e a subida das tensões para valores normais.

Outro facto importante foi o disparo de várias linhas de 345 kV e 138 kV por contacto com árvores, mostrando a importância da limpeza das faixas das linhas aéreas.

A inexistência de um índice ao colapso para avaliação, em tempo real pela FE e CR MISO, da distância ao colapso de tensão, levaram a uma frágil avaliação da situação do sistema eléctrico. Esta ferramenta permitiria analisar o impacto da saída de serviço dos bancos de condensadores e, naturalmente, suspender a sua saída de serviço. Também poderiam encontrar outras medidas correctivas a ser tomadas, com base na análise deste índice, para evitar a deterioração progressiva da estabilidade da tensão da rede. A falta desta ferramenta de análise leva a uma incompreensão adequada do sistema, no ponto de vista da estabilidade da tensão, levando os gestores a tomarem decisões erradas.

Com este estudo fica demonstrado a importância de uma gestão correcta da produção da energia reactiva para evitar problemas de estabilidade de tensão, bem como da necessidade da existência de um índice ao colapso para avaliação, em tempo real, da distância ao colapso de tensão.

Capítulo 4

REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS

CAPÍTULO 4

REDES NEURONIAS ARTIFICIAIS

4.1 – Introdução

Nos anos cinquenta do século passado, a comunidade científica observou que certas tarefas que os seres humanos resolviam de uma maneira muito simples, eram extremamente complexas para serem programadas num computador do tipo Von Neumann, onde as instruções eram realizadas em série. Descobriram que a resposta para esta diferença estava relacionada com o tipo de processamento, ou seja, enquanto o cérebro humano tem um processamento massivamente paralelo, o computador tem um processamento série. Esta diferença motivou o interesse para a investigação nesta nova área, culminando com o aparecimento de Redes Neurais Artificiais (RNA).

As RNA foram inspiradas no cérebro humano, tendo por isso um processamento paralelo. A identificação de objectos ou caracteres, condução automóvel ou diagnósticos médicos são exemplos em que as RNA têm, face ao processamento série, melhor desempenho quanto à rapidez, precisão e fiabilidade.

As RNA são hoje em dia ferramentas que são aplicadas em todas as áreas do conhecimento. Nasce então o interesse de estudar estas novas ferramentas para aplicar também na área dos sistemas eléctricos.

Neste capítulo irão ser apresentados os fundamentos teóricos das RNA, para posteriormente se realizar a sua aplicação ao cálculo da distância ao colapso. Pretende-se assim ultrapassar as limitações dos métodos clássicos de cálculo, os FC, que para redes de grande dimensão têm tempos de cálculo muito elevados. O desenvolvimento de um método rápido e fiável para calcular a distância ao colapso permitirá ultrapassar estas limitações.

4.2 – Inspiração Biológica: O Cérebro Humano

Os sistemas nervosos dos seres vivos, em especial dos seres humanos, inspiraram os investigadores para desenvolverem as RNA. O sistema nervoso central humano é constituído por aproximadamente 10^{11} elementos básicos, que se chamam neurónios, e cada um poderá ter até 10^4 ligações com outros neurónios [Hay99].

O cérebro humano é uma estrutura muito complexa que tem a capacidade de tratar a informação de uma forma não linear e paralela. Possui também a capacidade de organizar os seus neurónios, de forma a executar muitas tarefas complexas como, por exemplo, o reconhecimento de padrões ou voz que, ainda não está ao alcance dos computadores actuais com a mesma rapidez. A sua velocidade de processamento é devido à utilização de uma estrutura maciçamente paralela, pois os neurónios são cerca de 5 a 6 vezes mais lentos do que uma porta lógica de silício.

Um neurónio é uma célula complexa que responde a sinais electroquímicos, sendo composto por um núcleo, um corpo celular, um numeroso conjunto de dendrites, entidades que recebem sinais de outros neurónios via sinapses, e por um axónio, que transmite um estímulo a outros neurónios, através das já referidas sinapses [Cor02]. Na figura 4.1 apresenta-se a estrutura de um neurónio biológico.

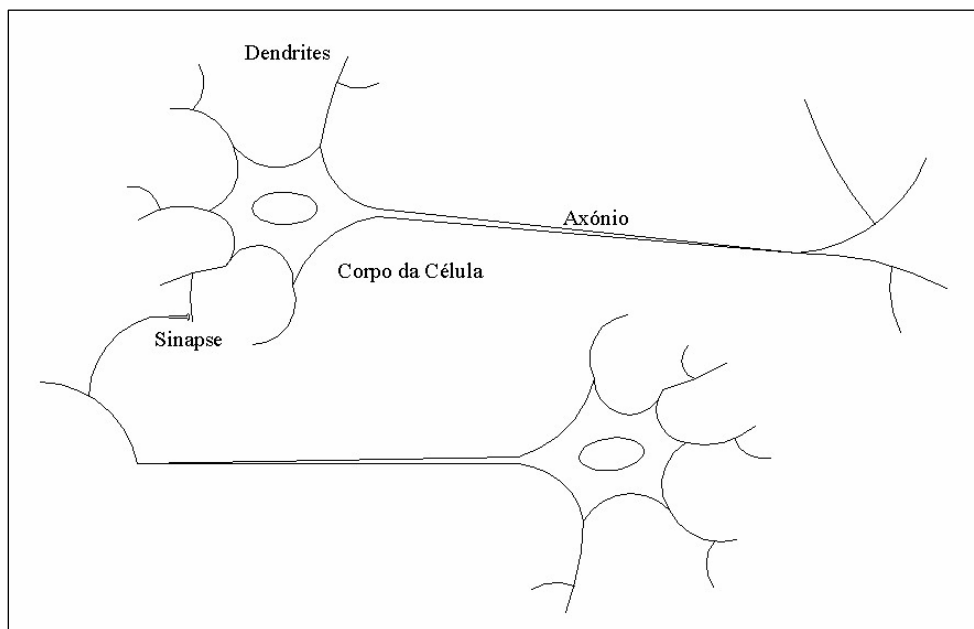


Figura 4.1 – Estrutura de um neurónio biológico

4.3 – Modelo do neurónio artificial

As redes neuronais artificiais são constituídas por neurónios que constituem os seus elementos base e correspondem a unidades de processamento de informação básicas. O neurónio é assim uma unidade de processamento de informação que é fundamental para a operação das redes neuronais artificiais. Na figura 4.2 é apresentado o diagrama de blocos do neurónio artificial [Hay99]:

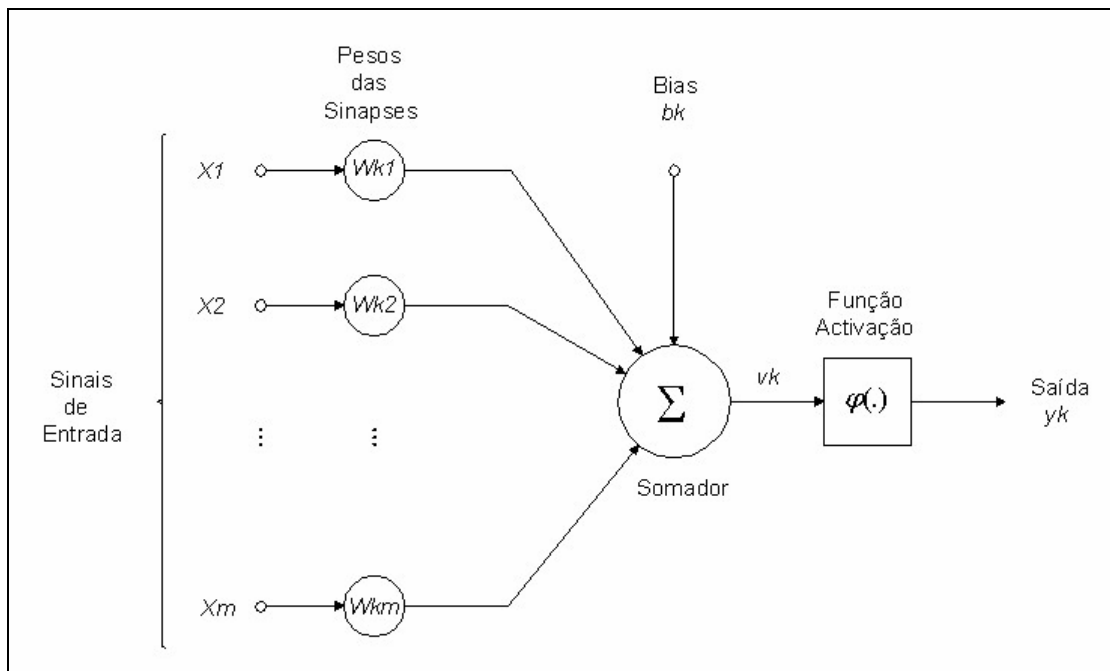


Figura 4.2 – Diagrama de blocos do neurónio artificial

É possível identificar três elementos básicos no modelo do neurónio artificial:

- um conjunto de ligações (sinapses), sendo cada uma caracterizada por ter um factor de multiplicação, também chamado peso (*weight*), com valor w_{kj} , por estar ligado entre a entrada j e o neurónio k , e que vai afectar o sinal de entrada x_j . Os valores do factor sinapse tanto podem ser positivos como negativos;
- um somador para a adição dos sinais de entrada já afectados pelos factores das sinapses;
- uma função da activação, também chamada de função de transferência, para limitar a amplitude da saída do neurónio, assim como também converter o sinal pela

aplicação de funções de actuação não lineares. Tipicamente os valores de saída estão no intervalo $[0, 1]$ ou no intervalo $[-1, 1]$.

O modelo do neurónio também inclui a aplicação externa de uma polarização, bias representada por b_k . A bias serve para aumentar ou diminuir o valor da entrada da função da activação dependendo do valor de b_k ser positivo ou negativo.

O modelo matemático do neurónio é representado pelas seguintes equações [Hay99]:

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} \cdot x_j \quad (4.1)$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k) \quad (4.2)$$

Onde:

- x_1, x_2, \dots, x_m são os sinais de entrada do neurónio;
- $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$, são os pesos (factores de multiplicação) das sinapses do neurónio k ;
- u_k é uma combinação linear que será a entrada da função de activação;
- b_k é a bias;
- $\varphi(.)$ é a função de activação do neurónio;
- y_k é o sinal de saída do neurónio.

A aplicação da bias provoca uma transformação linear da saída u_k podendo ser representada pela equação:

$$v_k = u_k + b_k \quad (4.3)$$

Considerando a bias b_k como sendo um parâmetro externo e tendo em conta a equação 4.2, o modelo matemático poderá ser representado pelas equações:

$$u_k = \sum_{j=0}^m w_{kj} \cdot x_j \quad (4.4)$$

$$y_k = \varphi(v_k) \quad (4.5)$$

As diferenças entre o primeiro e o segundo modelo matemático estão na criação de uma nova sinapse cujo valor de entrada é constante e de valor igual a +1 (x_0) e cujo peso é igual a b_k . Este novo modelo é apresentado na figura 4.3, sendo diferente, em aparência, em relação ao primeiro modelo, representado na figura 4.2 mas, matematicamente os dois modelos, são equivalentes.

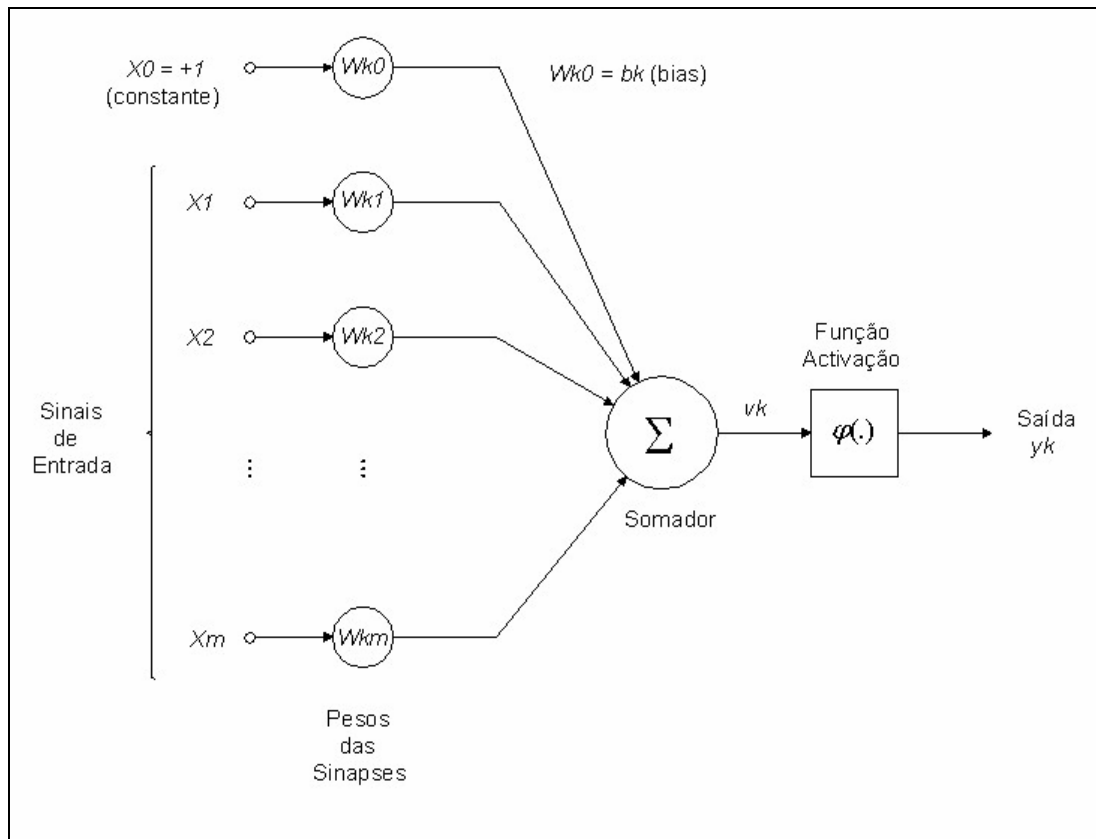


Figura 4.3 – Diagrama de blocos do neurónio artificial (2º modelo)

Gráficos de Redes Neurais

A utilização de gráficos de redes neurais simplifica a aparência do modelo representado pelo método de diagrama de blocos, figuras 4.2 e 4.3, que fazem uma descrição funcional dos vários elementos do modelo, usando a ideia de gráfico de fluência de sinal.

O gráfico de fluência de sinal é composto por ramos que interligam os nodos. As regras para a construção deste tipo de gráfico são as seguintes [Hay99]:

- o sinal flui ao longo do ramo unicamente pela direcção definida pela seta, havendo dois tipos diferentes de ramos:
 - ramos do tipo sinapse com um comportamento linear entre o sinal de entrada e saída, ou seja, o sinal de entrada x_j é multiplicado pelo peso da sinapse w_{kj} produzindo o sinal do nodo y_k , ver figura 4.4 a;
 - ramos do tipo activação que normalmente têm um comportamento não linear entre o sinal de entrada e saída, ou seja, ao sinal de entrada x_j é aplicada a função de activação $\varphi(.)$, produzindo o sinal do nodo y_k , ver figura 4.4 b;
- o sinal do nodo é igual á soma algébrica de todos os sinais que entram no mesmo nodo pelos vários ramos que lhe estão ligados, correspondendo este caso ao nodo com ramos convergentes, ver figura 4.4 c;
- o sinal do nodo é transmitido a todos os ramos que lhe estão ligados, correspondendo este caso ao nodo com ramos divergentes, ver figura 4.4 d.

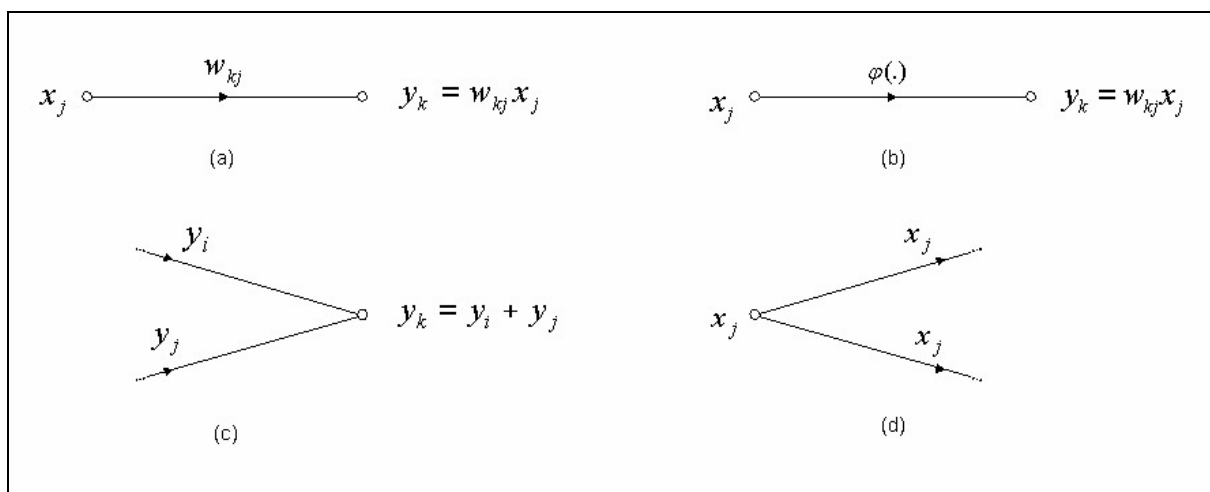


Figura 4.4 – Regras básicas para a construção de gráfico de redes neurais

A figura 4.5 apresenta o modelo do neurónio representado neste caso em forma de gráfico de fluência de sinal.

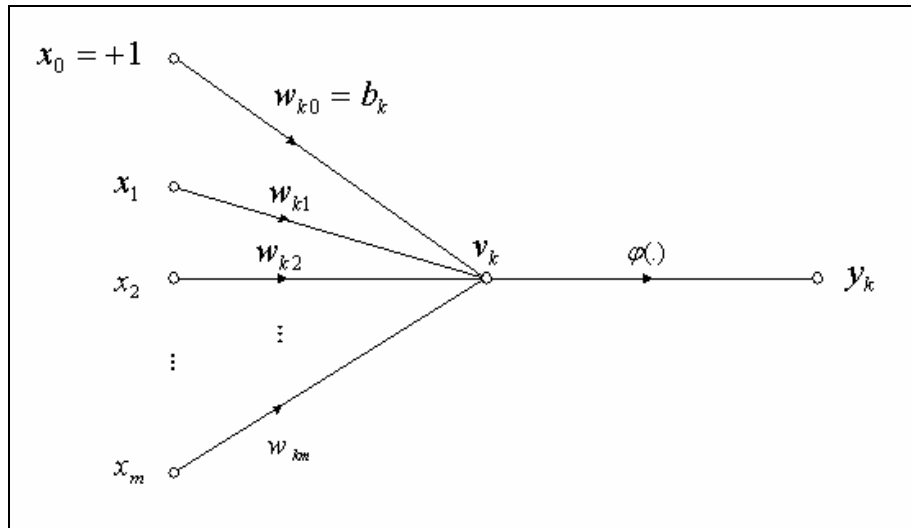


Figura 4.5 – Gráfico do neurónio artificial

4.4 – Tipos de Funções de Activação

As funções de activação de um neurónio, também chamado por outros autores de função de transferência, podem ser agrupadas em lineares ou não lineares. Exemplos das funções de activação lineares são a função limiar e troços, ver figura 4.6 a e b. Exemplos de funções de activação não lineares são a função logística, ver figura 4.6 c, e tangente hiperbólica. A tabela 4.1 apresenta as características destes quatro tipos de funções de activação. A sua escolha vai depender do tipo de problema que se pretende resolver e também tendo em conta a satisfação das especificidades do problema em concreto.

A função de activação logística, também conhecida por função sigmoide, é a função mais usada na construção de redes neuronais. Tendo a forma aproximada de um "S" deitado, é uma função crescente que mostra um balanceamento gracioso entre um comportamento linear e não linear. Ao variar a sua inclinação "a", ver figura 4.6 c, obtêm-se funções com diferentes declives, tendendo para a função limiar quando no limite o factor de inclinação (a) se aproxima do infinito.

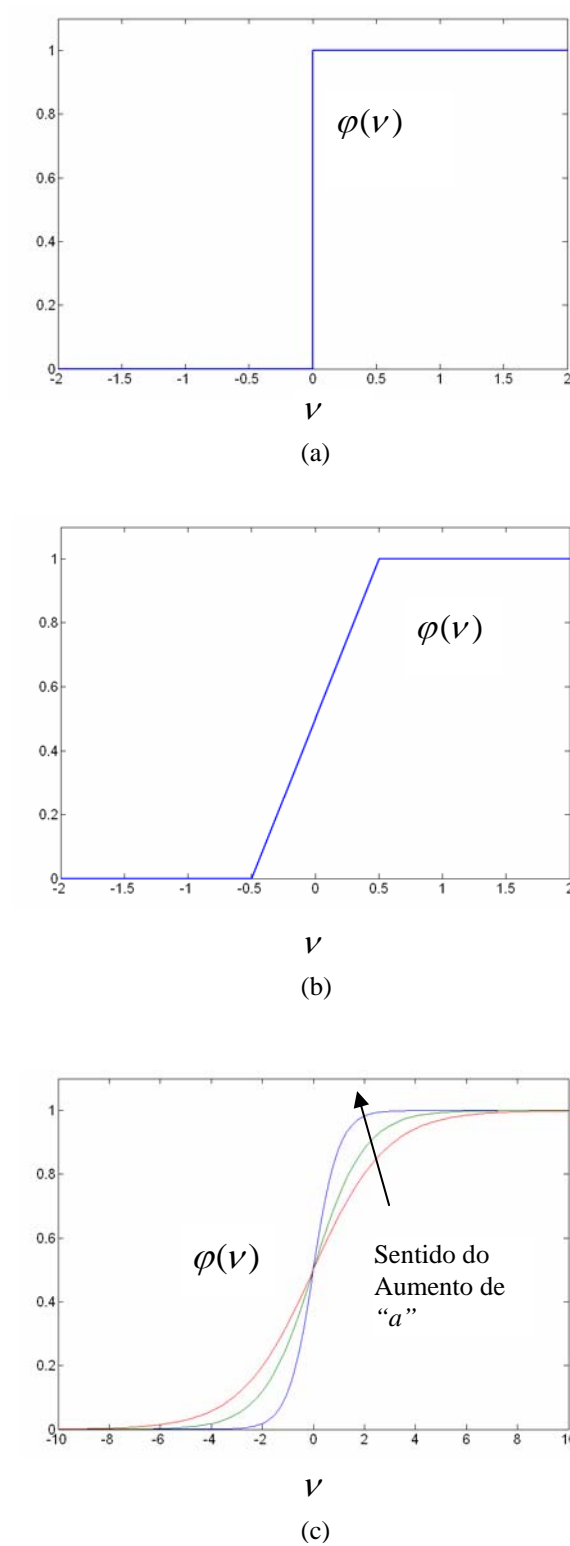


Figura 4.6 – Funções de Activação de redes neurais

Tabela 4.1 – Funções de Activação

Nome	Função v	Contradomínio
Limiar	$\begin{aligned} &1 \text{ se } v \geq 0 \\ &0 \text{ se } v < 0 \end{aligned}$	$\{0,1\}$
Troços	$\begin{aligned} &1 \text{ se } v \geq 0.5 \\ &v \text{ se } 0.5 > v > -0.5 \\ &0 \text{ se } v \leq -0.5 \end{aligned}$	$\{0,1\}$
Logística	$\varphi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)}$	$[0,1]$
Tangente Hiperbólica	$\varphi(v) = a \tanh(bv)$	$[-1,1]$
Seno	$\varphi(v) = \sin(v \bmod 2\pi)$	$[-1,1]$
Coseno	$\varphi(v) = \cos(v \bmod 2\pi)$	$[-1,1]$
Gaussiana	$\varphi(v) = e^{\frac{-v_i^2}{2a^2}}$	$[-1,1]$

4.5 – Arquitectura da rede neuronal

A maneira como os nodos, neurónios artificiais, estão interligados numa rede neuronal artificial é chamada por arquitectura ou topologia da rede. O tipo de arquitectura usada numa rede neuronal está intimamente ligado com o algoritmo de aprendizagem usado no treino da mesma rede. Normalmente, é possível identificar três categorias fundamentais de topologias [Hay99]:

- Redes Neurais Unidireccionais¹ de uma camada;
- Redes Neurais Unidireccionais de várias camadas;
- Redes Neurais Recorrentes.

Redes Neurais Unidireccionais de uma camada

As Redes Neurais Unidireccionais (RNU) de uma camada são organizadas por camadas e são caracterizadas por não existirem ciclos. Por essa razão as ligações propagam-se sempre numa só direcção e de uma forma convergente ou divergente. Este primeiro tipo de rede tem a forma mais simples que se pode definir, pois só tem uma camada de entrada e outra de saída. A camada de entrada recebe as informações do exterior e transmite-as, através das sinapses à segunda e última camada. Na camada de saída é realizado o somatório (4.1) e é aplicada a função de transferência (4.2) e por isso também chamado de nodo de computação. Um exemplo deste tipo de rede neuronal é apresentado na figura 4.7.

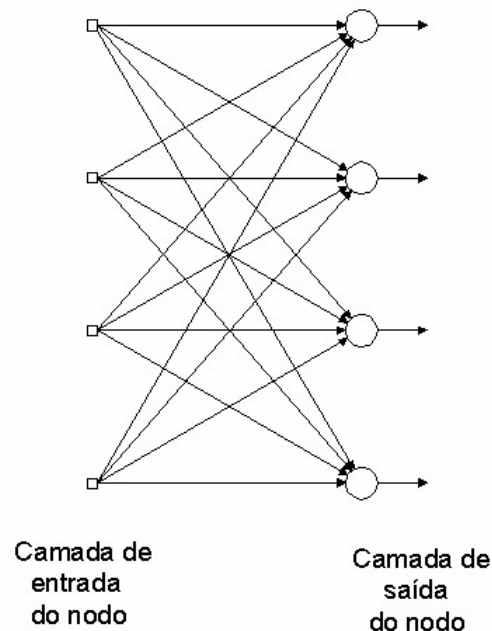


Figura 4.7 – Arquitectura de uma Rede Neuronal Unidireccional de uma camada

Redes Neurais Unidireccionais de várias camadas

As Redes Neurais Unidireccionais (RNU) de várias camadas, segunda categoria de redes unidireccionais, são funcionalmente iguais à primeira categoria, mas distinguindo-se da primeira por terem uma ou várias camadas escondidas. Têm como campo de aplicação

¹ Tradução adoptada do inglês *Feedforward*

problemas de classificação, memória associativa, reconhecimento de padrões e regressão entre outras possíveis aplicações. A topologia pode ser definida por (E,I,S) sendo: (E) o número de nodos de entrada; (I) o número de nodos intermédios (escondidos), unidades internas de processamento que permitem aumentar a capacidade de aprendizagem de tarefas intermédias; (S) o número de nodos de saída que exteriorizam a resposta da rede. Na figura 4.8 apresenta-se a topologia de uma RNU de várias camadas com a topologia 4-4-2.

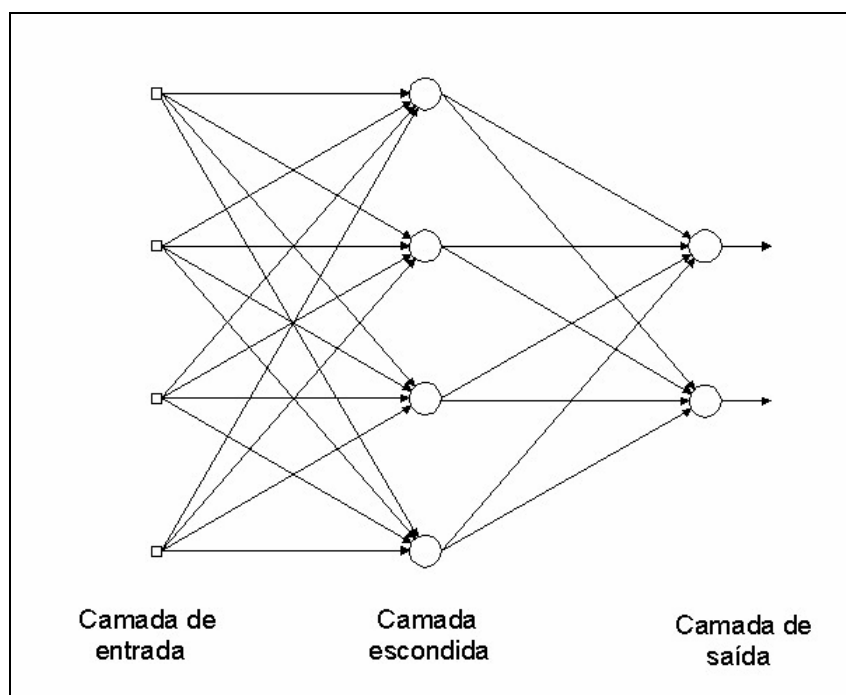


Figura 4.8 – Arquitectura de uma RNU de várias camadas com a topologia 4-4-2

Redes Neurais Recorrentes

As Redes Neurais Recorrentes (RNR) pertencem à terceira categoria de redes neuronais. As RNR distinguem-se das RNU por terem ciclos de realimentação. Na figura 4.9 apresenta-se a topologia de uma RNR. Como se pode ver na figura 4.9, os sinais de entrada dos primeiros quatro nodos de entrada são os sinais de saída dos quatro nodos de saída.

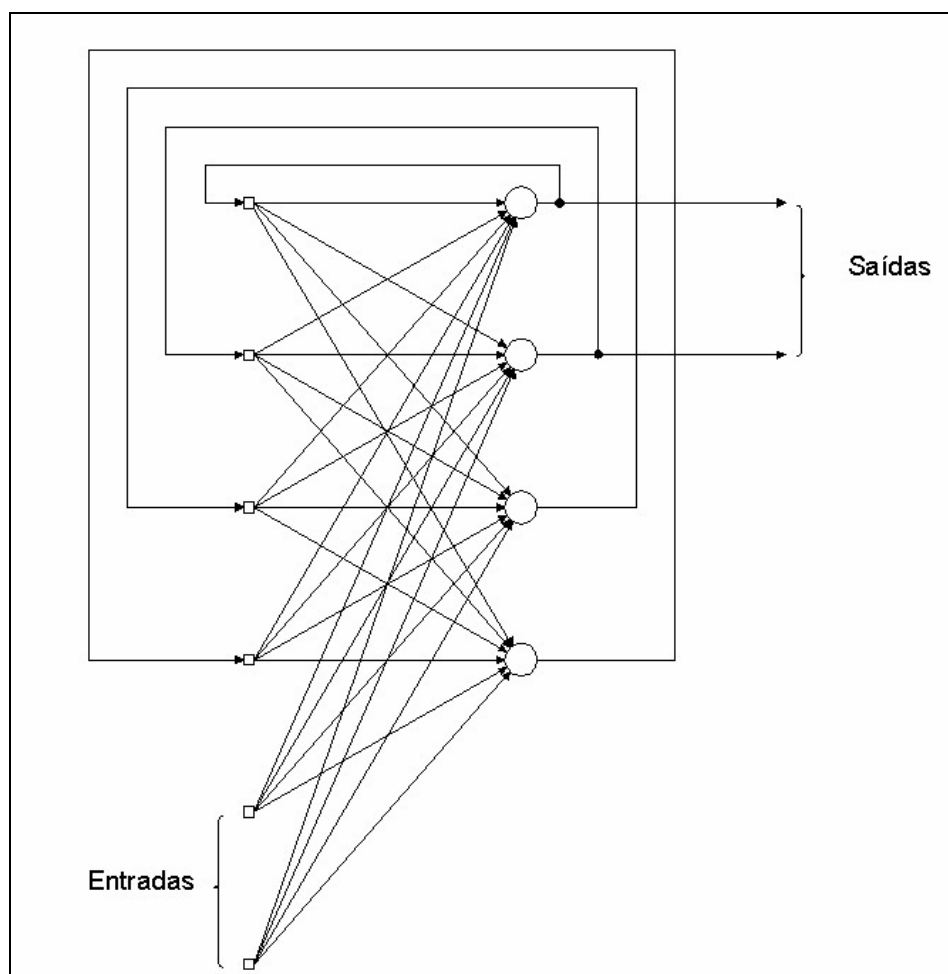


Figura 4.9 – Arquitectura de uma Rede Neuronal Recorrente

4.6 – Aprendizagem de uma rede neuronal

Uma propriedade importante das redes neuronais é a capacidade de aprender a partir do seu ambiente. Uma rede neuronal é estimulada a partir dos sinais de entrada fornecidos pelo seu ambiente. O ajustamento dos pesos das sinapses e níveis das bias, parâmetros livres que podem ser alterados durante o processo de aprendizagem, efectuado por um processo iterativo, dá resposta aos estímulos aplicados à rede neuronal. As alterações sofridas pela sua estrutura interna implicam uma resposta diferente da rede neuronal às novas entradas, estímulos, que venham do seu ambiente.

A aprendizagem das redes neuronais é efectuada a partir de algoritmos de aprendizagem ou treino, que constituem um conjunto bem definido de regras. Existem muitos algoritmos de

aprendizagem que unicamente diferem no modo como são efectuados os ajustamentos dos parâmetros livres.

A escolha da arquitectura e do método de aprendizagem é influenciada pela tarefa que se pretende dar à rede neuronal.

4.6.1 – Definição do erro-correcção de um processo de aprendizagem

Definição de erro

A primeira regra da aprendizagem de uma rede neuronal é a analisar o erro entre o valor de saída e o valor esperado para a mesma rede.

Para ilustrar esta regra iremos analisar um caso muito simples. Uma rede neuronal unidireccional é constituída por um único neurónio K na camada de saída, nodo computacional, ver figura 4.10. O sinal $v_k(n)$ produzido por uma ou mais camadas escondidas de neurónios é consequência dos estímulos, vector com as entradas, aplicados à camada de entrada. O argumento n significa tempo discreto de \mathbf{x} em relação ao processo iterativo da aprendizagem de uma rede neuronal.

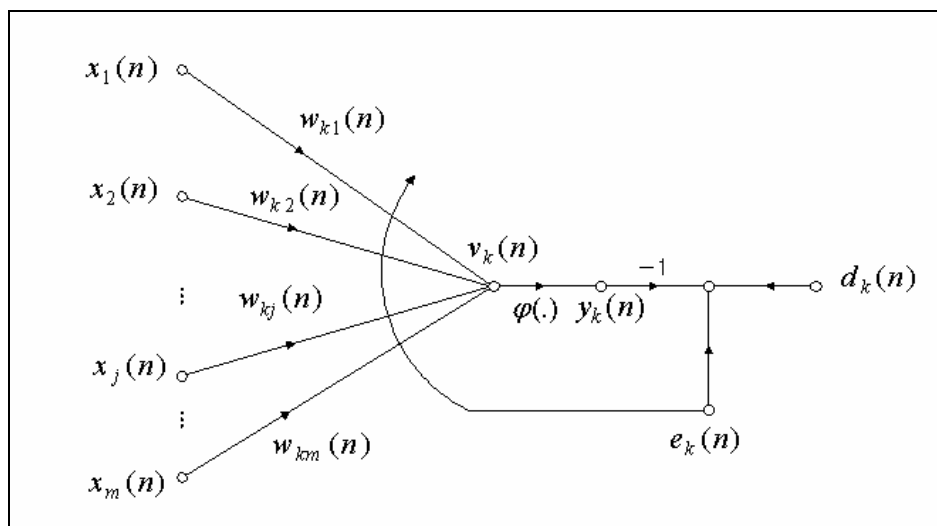


Figura 4.10 – Ilustração do erro-correcção na aprendizagem de uma RNU

O sinal de saída da rede neuronal $y_k(n)$ é comparado com o valor desejado para a saída $d_k(n)$, valor alvo. A comparação entre os valores da saída da rede neuronal e o desejado

permite calcular o erro $e_k(n)$, num dado tempo discreto n do processo iterativo. Por definição o erro será:

$$e_k(n) = d_k(n) + y_k(n) \quad (4.6)$$

A partir da avaliação do sinal de erro $e_k(n)$ é possível ajustar os parâmetros livres da rede neuronal, num processo iterativo, até que um valor mínimo seja obtido para o erro. Para atingir este objectivo é minimizada uma função custo $\xi(n)$, também chamada de valor instantâneo da energia do erro, definida em termos do sinal de erro como sendo:

$$\xi(n) = \frac{1}{2} e_k^2(n) \quad (4.7)$$

O método iterativo utilizado no processo de aprendizagem das redes neuronais permite passo a passo, o ajustamento sucessivo dos parâmetros livres das redes até que seja atingido um estado estacionário ou seja, a mudança entre iterações dos pesos das sinapses são desprezáveis. Atingido o estado estacionário o processo de aprendizagem está terminado.

Definição de correcção

Sendo a aprendizagem de uma rede neuronal um processo iterativo, em cada iteração são calculados os incrementos a adicionar aos pesos das sinapses da rede. Pela regra delta ou regra de *Widrow-Hoff* [Hay99], o incremento $\Delta w_{kj}(n)$ a adicionar ao peso da sinapse w_{kj} na iteração n é definida por:

$$\Delta w_{kj} = \eta e_k(n) x_j(n) \quad (4.8)$$

onde η é uma constante positiva que determina o passo da aprendizagem entre iterações e por isso também se chama parâmetro de aprendizagem. O incremento a adicionar ao peso da sinapse será proporcional ao produto do erro do sinal pelo valor de entrada da sinapse em questão e por uma constante.

O peso da sinapse, entre as iterações n e $n+1$, será calculado da seguinte forma:

$$w_{kj}(n+1) = w_{kj}(n) + \Delta w_{kj}(n) \quad (4.9)$$

A escolha do parâmetro de aprendizagem η é muito importante para que o processo iterativo de aprendizagem da rede neuronal seja convergente e estável.

4.7 – Perceptrão de Camada Simples

Rosenblatt (1958) foi o primeiro investigador a propor o primeiro modelo de uma rede neuronal artificial Perceptrão de Camada Simples (PCS) com aprendizagem supervisionada.

A rede neuronal PCS na sua forma mais simples é uma rede neuronal artificial usada para classificação de padrões que tenham separação linear, ver figura 4.11, ou seja, classes que se possam caracterizar em lados opostos de um hiperplano. Na sua forma mais básica é constituída por um neurónio onde o ajustamento dos pesos das sinapses e bias é realizado por aprendizagem supervisionada.

O objectivo de uma PCS é classificar um conjunto externo de entradas (estímulos) x_1, x_2, \dots, x_m entre duas classes, ℓ_1 e ℓ_2 . A regra de decisão para a classificação pela rede neuronal depende da sua saída, ou seja, se a saída y tiver o valor $+1$, o conjunto de entradas em causa pertence à classe ℓ_1 e, caso tenha o valor -1 pertence à classe ℓ_2 .

Nesta sua forma mais simples, esta rede neuronal é constituída por um neurónio, que permite a separação em duas classes. Para que seja possível a separação é necessário a existência de uma região de decisão definida por um hiperplano que é possível definir a partir da expressão:

$$\sum_{i=1}^m w_i x_i + b = 0 \quad (4.10)$$

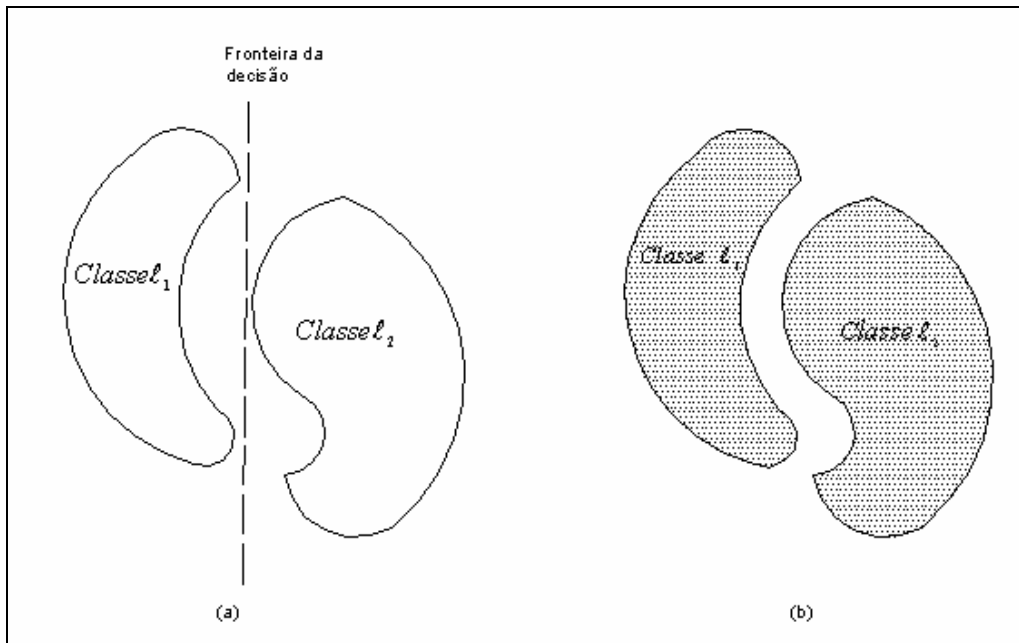


Figura 4.11 – Classes com separação linear (a) e sem separação linear (b)

Como exemplo a figura 4.12 apresenta a fronteira de decisão entre duas classes ℓ_1 e ℓ_2 para o reconhecimento de padrões de duas dimensões, duas variáveis de entrada x_1 e x_2 , que neste caso toma a forma de uma linha. Os pontos (x_1, x_2) abaixo da linha de decisão pertencem à classe ℓ_1 e os acima pertencem à classe ℓ_2 . O valor da bias permite retirar a linha de decisão da origem.

A aprendizagem da rede PCS é realizada usando a regra erro-corrector, já analisada na secção 4.6, também conhecida pelo algoritmo de convergência das redes perceptrão.

Exemplo de aplicação de reconhecimento de padrões

Pretende-se a utilização de uma rede neuronal PCS para a separação de dois tipos diferentes de fruta de acordo com o seu tipo. Aos dois tipos de fruta, com a ajuda de sensores, são analisadas três propriedades que a caracterizam: forma, textura e peso. O sensor da forma atribui o valor 1 à saída caso a fruta seja aproximadamente redonda e -1 se for mais elíptica. O sensor de textura atribui o valor 1 à saída caso a superfície da fruta seja lisa e -1 se for rugosa. O sensor de peso atribui o valor 1 à saída caso a fruta tenha um peso superior a um valor predefinido ou -1 se o seu peso seja inferior ao mesmo valor.

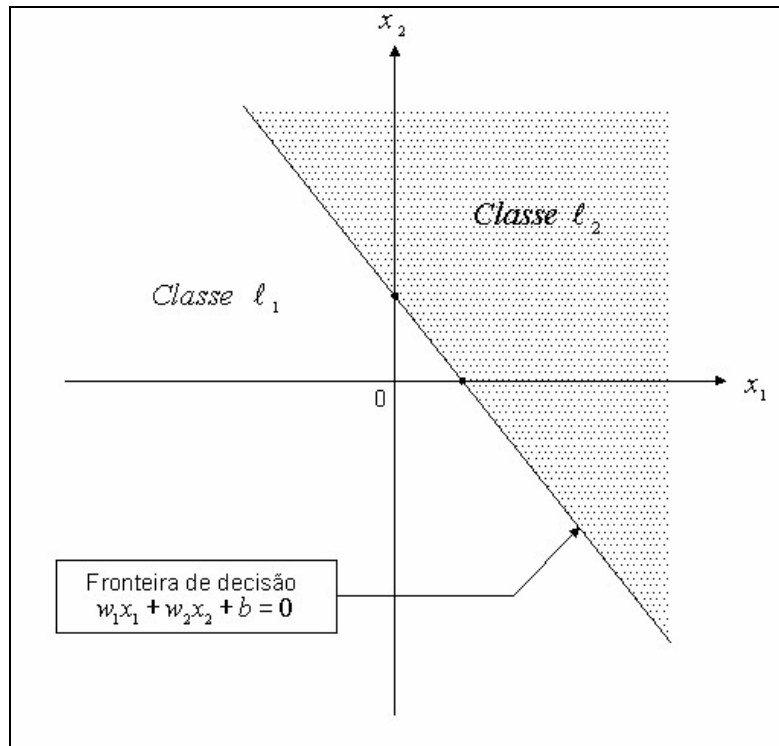


Figura 4.12 – Hiperplano de Fronteira de decisão para o reconhecimento de padrões de duas classes

A rede neuronal PCS terá como valores de entrada os valores de saída dos sensores que decidirão após análise da informação de entrada, se a fruta pertence à classe A ou B. Para este caso de aplicação os dois tipos de fruta a utilizar para separação serão laranjas e maçãs.

A figura 4.13 apresenta o diagrama de blocos para este caso de reconhecimento de padrões, utilizando uma rede neuronal PCS.

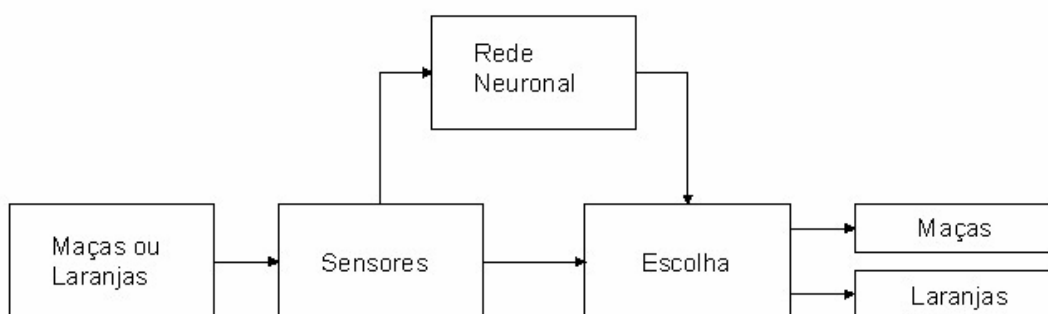


Figura 4.13 – Diagrama de blocos de uma rede neuronal perceptrão para o reconhecimento de padrões de duas classes de fruta

Cada tipo de fruta pode ser representado por vectores tridimensionais em que cada vector representa a propriedade que caracteriza:

$$p = \begin{bmatrix} \textit{forma} (p_1) \\ \textit{textura} (p_2) \\ \textit{peso} (p_3) \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

O vector que caracteriza a laranja será:

$$p_{\textit{laranjas}} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

O vector que caracteriza a maçã será:

$$p_{\textit{maças}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

A rede neuronal terá como informação de entrada vectores tridimensionais que após o reconhecimento do respectivo padrão toma a decisão entre os dois tipos de fruta.

A rede neuronal PCS, para este caso em que somente é necessário decidir entre duas categorias, será constituída por um único neurónio, com três entradas cuja equação, aplicando (4.1) e (4.2), será:

$$y = \phi \left(\begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & w_{1,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} + b \right) \quad (4.14)$$

A função de activação a utilizar é a função limiar, ver tabela 4.1, e pretende-se definir os valores dos parâmetros livres, pesos das sinapses e bias, para que o valor da saída y (4.13) ao valor 1 corresponda uma maçã e -1 a uma laranja.

Esta separação só será possível se existir um hiperplano que separe as duas classes. Como se pode ver na figura 4.14, os dois vectores que caracterizam o tipo de fruta (4.12 e 4.13), são simétricos ao hiperplano definido por pelos eixos P_1 e P_3 que permitem criar uma fronteira de decisão entre as duas classes.

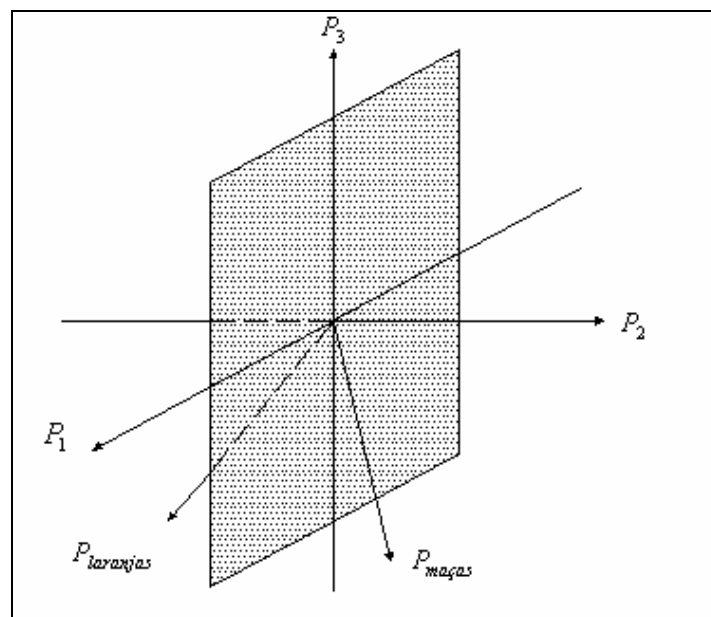


Figura 4.14 – Vectores que caracterizam os dois tipos de fruta e o hiperplano de separação das duas classes

O plano de decisão pode ser descrito pela equação:

$$p_2 = 0 \quad (4.15)$$

ou

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} + 0 = 0 \quad (4.16)$$

A matriz dos pesos e o valor da bias será então:

$$w = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad b = 0 \quad (4.17)$$

O valor da bias terá que ser zero porque o hiperplano de separação passa pela origem. Com os valores encontrados para os parâmetros livres da rede neuronal perceptrão é possível verificar se a classificação de padrões está correcta. Para a classificação de uma laranja a equação será:

$$y = \text{limiar} \left(\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} + 0 \right) = -1 \quad (4.18)$$

e a equação para uma maçã:

$$y = \text{limiar} \left(\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} + 0 \right) = 1 \quad (4.19)$$

Os resultados estão correctos, o que confirma o bom desempenho desta rede neuronal perceptrão.

4.8 – Percepção de Multicamada

As redes neurais artificiais Percepção Multicamada (PMC) são uma generalização das PCS analisadas na secção 4.7. Estas redes são do tipo RNU e constituídas por uma camada de entrada, uma camada de saída e uma ou mais camadas escondidas. As ligações entre neurónios são do tipo completamente ligadas, ou seja, todos os neurónios, de uma camada, têm ligações a todos os neurónios das camadas seguintes. Como exemplo, a figura 4.15 apresenta uma rede neuronal PMC com duas camadas escondidas.

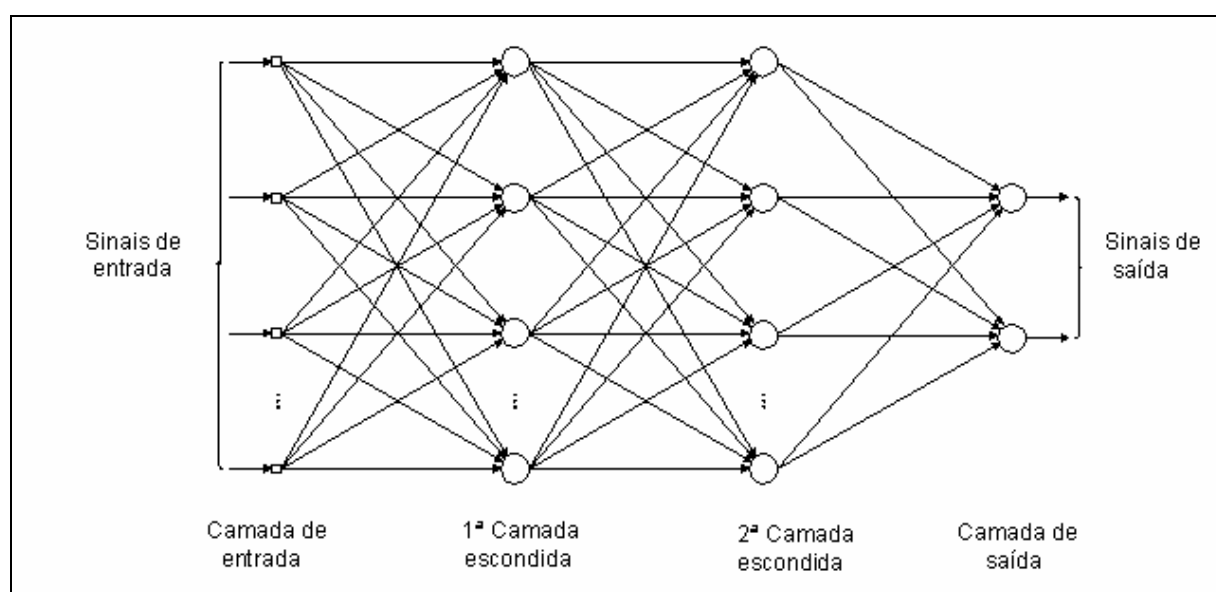


Figura 4.15 – Arquitectura de uma rede neuronal PMC com duas camadas escondidas

Este tipo de redes neurais constitui uma das mais importantes classes de redes neurais, com aplicação na memória associativa, classificação, regressão e reconhecimento de padrões entre outros [Cor02].

O algoritmo de Retro-Propagação (RP) é o algoritmo de aprendizagem supervisionada mais utilizado para o treino deste tipo de redes. Este algoritmo, baseando-se em métodos de gradiente descendente para a procura do mínimo da função de erro no espaço de busca dos pesos das sinapses, constitui um método muito eficiente, e dado as suas características, constitui também um marco muito importante para esta área científica.

As redes neurais PMC têm três características que as distinguem de outras redes neurais [Hay99]:

- a função de activação utilizada é não linear e totalmente diferenciável, sendo normalmente usada a função de activação logística, em oposição à função de activação limiar usada nas redes neuronais PCS. A utilização desta função de activação aproxima-se mais do modelo biológico;
- a estrutura deste tipo de redes contém uma ou mais camadas de neurónios escondidos, além das camadas de entrada e saída, que as torna capaz de treinar complexas tarefas, a partir dos vectores de entrada;
- a rede utilizada tem um alto grau de conectividade entre neurónios. Uma mudança no grau de conectividade provoca uma grande mudança na população de sinapses e dos seus pesos, parâmetros livres.

A topologia ideal, número de camadas escondidas, nodos e grau de conectividade, depende do problema a ser tratado.

4.8.1 – O Algoritmo Retro-Propagação

O algoritmo RP é um marco importante, dado que constitui um método eficiente de treino das redes neuronais do tipo PMC. Baseando-se em métodos de gradiente descendente, exige o uso de funções de activação diferenciáveis para que a função de erro ξ seja contínua e diferenciável. Este algoritmo é constituído por duas fases, sendo a primeira fase chamada de “em frente” e a segunda fase chamada de “retro-propagação”, dando o nome ao algoritmo. Na primeira fase, a informação propaga-se no sentido da camada de entrada para a camada de saída e na segunda fase a informação propaga-se no sentido da camada de saída para a camada de entrada. Para exemplificar, na figura 4.16 são apresentados os dois sentidos de fluxo de informação do algoritmo RP.

Em frente

A primeira fase inicia-se pelo fornecimento do vector de entrada χ , à camada de entrada, propagando-se em frente, camada a camada, de acordo com as equações 4.1 e 4.2 até que, na camada de saída são produzidos os sinais de saída como resposta da rede. Durante toda esta fase, os pesos das sinapses da rede mantêm-se com um valor constante.

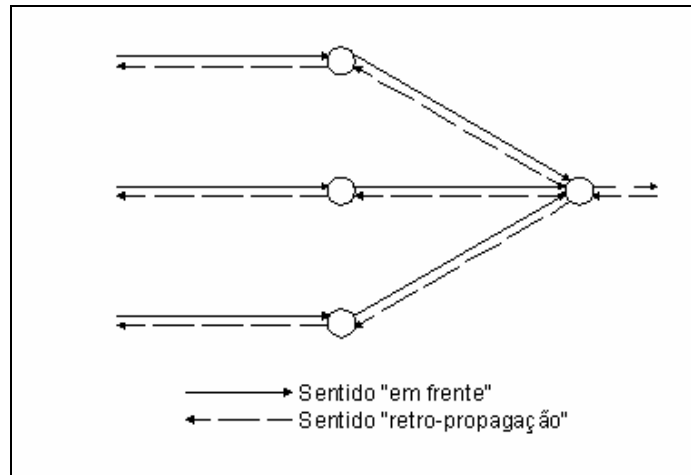


Figura 4.16 – Os dois sentidos de fluxo de informação do algoritmo retro-propagação

De acordo com a equação (4.6), o erro para o neurónio de saída j e para a iteração n é dado pela equação:

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (4.20)$$

A função custo (4.7) agora será dada pela equação:

$$\xi(n) = \frac{1}{2} \sum_{k \in C} e_j^2(n) \quad (4.21)$$

onde o conjunto C inclui todos os neurónios da camada de saída, isto é, da camada visível, mas tem em conta todas as camadas escondidas. O valor médio da função custo será dada pela equação:

$$\xi_{AV} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \xi(n) \quad (4.22)$$

onde N é o número total de exemplos do conjunto de treino.

Retro-Propagação

O objectivo da segunda fase é ajustar os parâmetros livres, minimizando a função custo ξ_{AV} . Como o nome indicia, é realizada uma retro-propagação do erro, ou seja, o ajustamento dos pesos dos parâmetros livres é realizada, no sentido da camada de saída até à camada de entrada, de acordo com o erro calculado para cada vector presente na entrada.

O ajustamento do peso de uma sinapse ajusta-se a seguinte forma:

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \delta_j(n) y_i(n) \quad (4.23)$$

onde η é a taxa de aprendizagem e $\delta_j(n)$ é o gradiente local, o que significa que o seu valor irá depender da localização do neurónio. Caso o neurónio j pertença à camada de saída, o gradiente local é calculado da seguinte forma:

$$\delta_j(n) = e_j(n) \phi'_j(v_j(n)) \quad (4.24)$$

ou seja: o gradiente local é igual ao produto do sinal de erro pela derivada associada à função de activação. Na figura 4.17 apresenta-se o fluxo de informação no neurónio da camada de saída j .

Caso o neurónio j pertença a uma camada escondida o gradiente será igual:

$$\delta_j(n) = \phi'_j(v_j(n)) \sum_k \delta_k(n) w_{kj}(n) \quad (4.25)$$

ou seja: neste caso em que o neurónio j pertence a uma camada escondida, o gradiente local é igual ao produto da derivada associada à função de activação do próprio neurónio j pelo somatório do produto entre os gradientes locais dos neurónios k , da camada seguinte a ele ligados, pelos pesos das respectivas ligações.

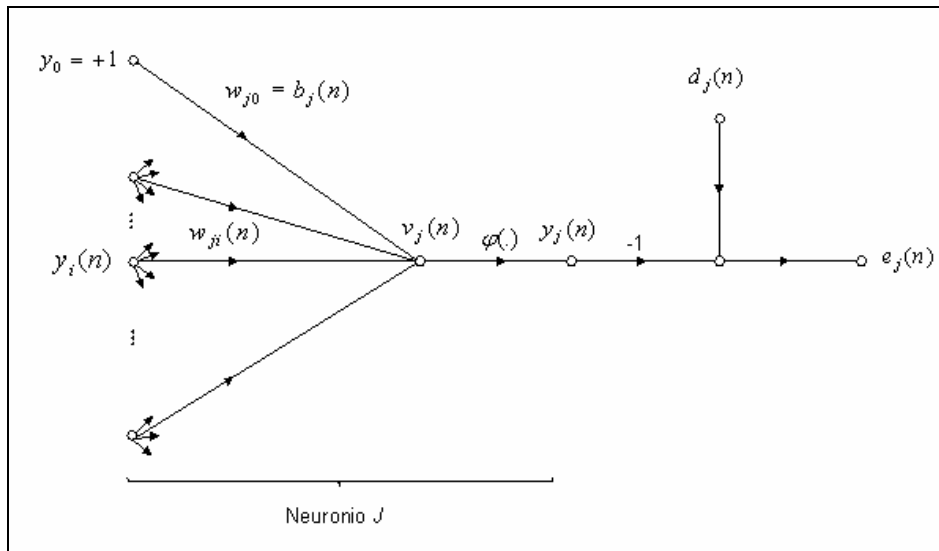


Figura 4.17 – O fluxo de informação no neurónio da camada de saída j

Na figura 4.18 é apresentado o fluxo de informação no neurónio k , da camada de saída, e do neurónio j , da camada escondida a ele ligado.

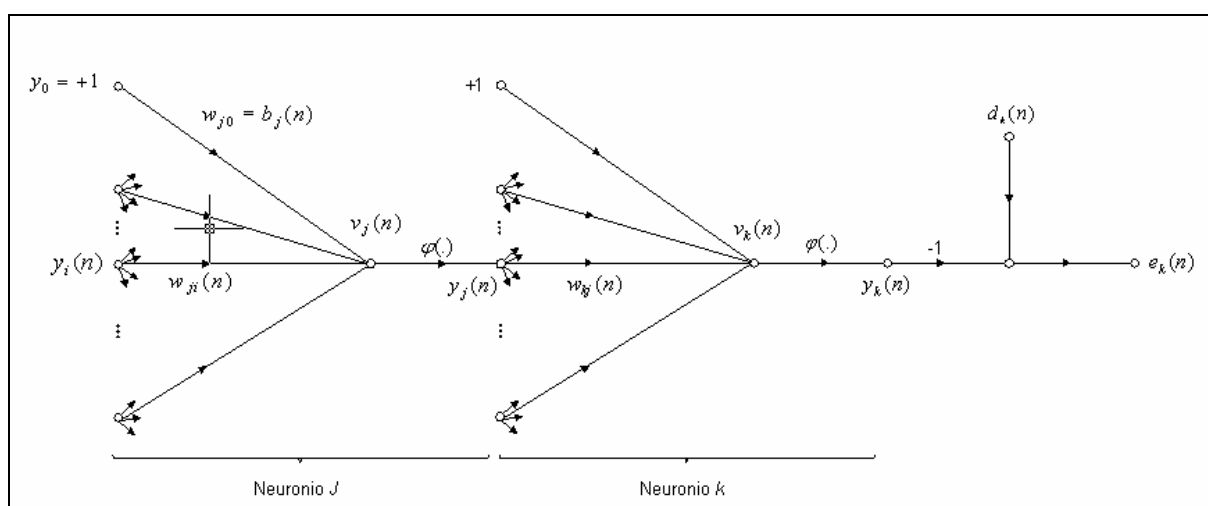


Figura 4.18 – Fluxo de informação do neurónio da camada de saída k ligado a um neurónio j da camada escondida a ele ligado

Funções de activação

Nas redes neuronais PMC é necessário conhecer a derivada da função de activação para ser possível realizar o cálculo do gradiente local δ , através das equações 4.24 e 4.25, para possibilitar por sua vez, o cálculo do ajustamento dos pesos, pela equação 4.23.

A função de activação tem que ser contínua para que a derivada exista, como acontece nas funções de activação logística e tangente hiperbólica, usualmente usadas nas redes neuronais PMC.

A função de activação logística é em geral definida por:

$$\varphi_j(v_j(n)) = \frac{1}{1 + \exp(-av_j(n))} \quad (4.26)$$

em que:

$$a > 0 \text{ e } -\infty < v_j(n) < \infty \quad (4.27)$$

sendo “ a ” um parâmetro que define a inclinação da curva, ver figura 4.6 c, e $v_j(n)$ o sinal de entrada na função de activação na iteração n . O sinal de saída y_j está dentro do intervalo $0 \leq y_j \leq 1$.

A derivada da função de activação é calculada através da equação:

$$\varphi'_j(v_j(n)) = ay_j(n)[1 - y_j(n)] \quad (4.28)$$

Substituindo a equação 4.28 na equação 4.24, o gradiente local para um neurónio da última camada e para a função de activação logística será calculado pela equação:

$$\delta_j(n) = a[d_j(n) - y_j(n)]y_j(n)[1 - y_j(n)] \quad (4.29)$$

sendo $d_j(n)$ a saída desejada. Por outro lado, para um neurónio arbitrário de uma camada escondida será calculado pela equação:

$$\delta_j(n) = ay_i(n)[1 - y_i(n)]\sum_k \delta_k(n)w_{kj}(n) \quad (4.30)$$

A função de activação tangente hiperbólica é em geral definida por:

$$\varphi_j(v_j(n)) = a \tanh(bv_j(n)) \quad (4.31)$$

onde a e b são constantes e superiores a zero. A derivada desta função de activação é calculada através da equação:

$$\varphi'_j(v_j(n)) = \frac{b}{a} [a - y_j(n)] [a + y_j(n)] \quad (4.32)$$

Substituindo a equação 4.32 na equação 4.24, o gradiente local para um neurónio da última camada e para a função de activação tangente hiperbólica será calculado pela equação:

$$\delta_j(n) = \frac{b}{a} [d_j(n) - y_j(n)] [a - y_j(n)] [a + y_j(n)] \quad (4.33)$$

Para um neurónio arbitrário de uma camada escondida será calculado pela equação:

$$\delta_j(n) = \frac{b}{a} [a - y_j(n)] [a + y_j(n)] \sum_k \delta_k(n) w_{kj}(n) \quad (4.34)$$

Utilizando directamente, para o cálculo do gradiente local, as equações 4.29 e 4.30 ou 4.33 e 4.34, respectivamente para a função de activação logística e tangente hiperbólica. Desta forma deixa de ser necessário explicitar as funções de activação.

Taxa de aprendizagem

O cálculo do incremento dos parâmetros livres, no algoritmo RP, tem em conta a taxa de aprendizagem η (4.23). A boa definição deste parâmetro, para a aprendizagem das redes neuronais PMC, é muito importante para a sua rápida convergência para o valor mínimo da função custo. Por um lado, se o valor de η é muito grande, provoca instabilidade no treino, em geral, um movimento oscilatório devido aos elevados incrementos dos parâmetros livres. Por outro lado, quanto mais pequeno for o valor de η , mais pequenos são os incrementos dos parâmetros livres, provocando uma suavização na procura dos mínimos globais, mas provocando uma aprendizagem mais lenta.

Um método simples de aumentar a taxa de aprendizagem, sem provocar instabilidade, é incluir na regra de aprendizagem (4.23) um termo de *momentum* que permita a aceleração nas descidas de gradiente, e tenha um efeito de estabilização em situações oscilatórias. A equação 4.23 com a inclusão do termo de *momentum* ficará:

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \delta_j(n) y_i(n) + \alpha \Delta w_{ji}(n-1) \quad (4.35)$$

onde α representa a constante de *momentum* a que normalmente é dado um valor positivo escolhido no intervalo [0,1].

A inclusão do termo *momentum*, na regra de aprendizagem, tem um benefício de evitar que a função de erro caía num mínimo local, ver figura 4.19.

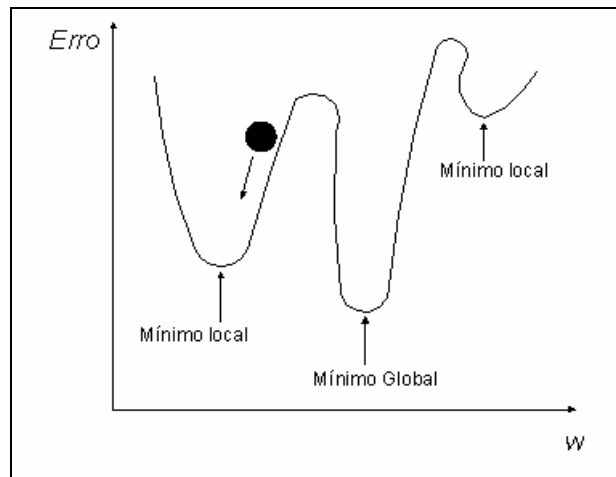


Figura 4.19 – Mínimos locais e globais da função erro

Modo de treino

A aprendizagem de uma rede neuronal inicia-se pela apresentação completa de todos os exemplos de treino à camada de entrada, que corresponde à primeira iteração, *epoch*. Para que não haja uma tendência para valorizar certos casos particulares de treino é conveniente que a apresentação dos exemplos seja realizada de uma forma aleatória.

Como já referido, em cada iteração são calculados os novos valores dos parâmetros livres até que estes estabilizem e o erro médio quadrático se torne no valor mínimo.

A aprendizagem de um rede neuronal PMC é possível realizar-se de duas maneiras:

- **modo sequencial**, também chamado de modo *on-line* ou modo estocástico. Neste modo de treino, os ajustamentos dos parâmetros livres são realizados logo após o seu cálculo e referentes ao primeiro exemplo apresentado na camada de entrada. Isto significa, para ser mais específico, que para um conjunto de treino com N exemplos arranjados segundo a ordem $(\mathbf{x}(1), \mathbf{d}(1)), \dots, (\mathbf{x}(N), \mathbf{d}(N))$, onde os vectores \mathbf{x} correspondem aos valores a apresentar à camada de entrada da rede neuronal PMC e os vectores \mathbf{d} correspondem aos valores alvo que se pretende obter com o treino da rede neuronal e que também permitem o cálculo dos erros. Com a saída de resultados correspondente à apresentação do primeiro exemplo $(\mathbf{x}(1), \mathbf{d}(1))$, é possível calcular os incrementos dos parâmetros livres, da forma já descrita para o algoritmo RP, e realizar os respectivos ajustamentos. Significa que

no treino com o segundo exemplo ($\mathbf{x}(2)$, $\mathbf{d}(2)$), os parâmetros livres já estão afectados pelo ajustamento provocado pelo treino do primeiro exemplo e assim sucessivamente até ao último exemplo ($\mathbf{x}(N)$, $\mathbf{d}(N)$);

- **modo em lote** ou por iteração, os ajustamentos dos parâmetros livres só são realizados ao fim da apresentação de todos os exemplos na camada de entrada que constituem uma iteração.

O primeiro modo de treino, sendo um modo de treino sequencial, tem a vantagem de a função erro dificilmente ir cair em mínimos locais devido à apresentação aleatória dos exemplos de treino. Também tem a vantagem de exigir menos memória local, o que é uma grande vantagem quando o conjunto de dados de treino é elevado e existe muita informação redundante. Como desvantagem, existe a dificuldade de definir as condições para a convergência do algoritmo. O segundo modo de treino, o modo em lote, melhora a estimativa do vector de gradiente, devido a ter em conta todos os exemplos.

4.9 – Conclusões

O objectivo deste capítulo foi a apresentação teórica das RNA. A compreensão teórica das RNA ultrapassa a abordagem de caixa preta, permitindo o uso deste tipo de ferramentas com a compreensão do seu funcionamento.

O estudo das RNA iniciou-se com a análise do modelo do neurónio artificial para a compreensão deste elemento básico que corresponde à unidade de processamento de informação básica. Seguiu-se o estudo dos tipos de activação, topologias das redes e modos de aprendizagem.

Ultrapassada a primeira fase do estudo, foi então possível avançar para o estudo das redes neuronais PCS. Este estudo culminou com a aplicação de uma rede neuronal PCS, constituída por um único neurónio artificial, por isso na sua forma mais simples, para a classificação de padrões com separação linear.

Finalmente, foram estudadas as redes neuronais PMC, com bastante pormenor porque serão aplicadas para o cálculo da distância ao colapso. As redes neuronais PMC são mais

complexas, tendo os neurónios completamente ligados e podendo ter várias camadas escondidas, aumentando muito a sua dimensão e capacidade de processamento paralelo. Este tipo de redes neuronais constitui uma das mais importantes classes de redes neuronais, com aplicações muito vastas e importantes. Foi estudado o algoritmo de aprendizagem RP, muito usado neste tipo de redes. Este algoritmo baseia-se em métodos de gradiente descendente para a procura do mínimo da função de erro no espaço de busca dos pesos das sinapses.

Mesmo com todos os avanços já conseguidos, as RNA ainda se encontram muito distantes, em capacidade, velocidade de processamento e dimensão, do cérebro humano, em cujo modelo se baseiam.

Capítulo 5

RESULTADOS NUMÉRICOS E ANÁLISE CRÍTICA

CAPÍTULO 5

RESULTADOS NUMÉRICOS E ANÁLISE CRÍTICA

Considerações Gerais

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos pela aplicação das metodologias desenvolvidas, às redes de teste utilizadas. Além da apresentação dos resultados obtidos é também realizada uma análise crítica aos mesmos resultados.

Os algoritmos desenvolvidos foram implementados por rotinas desenvolvidas em MATLAB e tiveram como peça central o programa FCNR, também desenvolvido em MATLAB, para a realização dos FC pelo método NR. O programa FCNR será apresentado no anexo B. Todas as simulações utilizaram um critério de convergência de 10^{-4} e uma razão de transformação constante nos transformadores.

No início do capítulo, após esta secção de considerações gerais, serão apresentadas as redes de teste utilizadas.

Na segunda secção são apresentados os perfis de tensão das duas redes de testes utilizadas. Também são apresentados os resultados da investigação efectuada para justificar o andamento das curvas dos perfis de tensão.

Na terceira secção são analisados os barramentos críticos. A detecção dos barramentos que entram em primeiro lugar em colapso, barramentos críticos, é muito importante para uma boa gestão das redes eléctricas de energia.

Na quarta secção deste capítulo é apresentado um novo método de detecção do ponto de colapso.

Na quinta secção é realizado um estudo de contingências, de 1º e 2º nível, de linhas, geradores e bancos de condensadores por aplicação do novo método desenvolvido.

Na sexta secção deste capítulo é realizado um estudo, muito breve, só para exemplificar a possibilidade de aplicação do novo método FSQV nos estudos de planeamento da evolução da produção de energia reactiva.

Na sétima e última secção deste capítulo será apresentado um novo índice de distância ao colapso, que foi chamado NIVCP, obtido por aplicação do novo método FSQV.

5.1 - Descrição dos sistemas utilizados

As redes de teste utilizadas nas simulações são as redes de teste de 14 e 57 barramentos do IEEE [Was]. Foram escolhidas por serem redes de teste de referência para simulações em SEE. Como, ao longo deste capítulo, serão as únicas a ser utilizadas, unicamente serão referidas pelo número de barramentos.

Nas figuras 5.1 e 5.2 apresentam-se os esquemas unifilares das referidas redes de testes do IEEE.

No anexo A são apresentados os dados, parâmetros das linhas e os resultados dos fluxos de cargas pelo método *Newton Raphson*, para os sistemas de teste de 14 e 57 barramentos do IEEE.



5.2 – Os perfis de tensão dos barramentos

O carregamento das redes é realizado por um FC contínuo que foi apresentado na secção 2.6.2. A rotina desenvolvida, além de controlar o crescimento de cargas, controla também os limites de produção de energia reactiva dos geradores dos barramentos PV.

5.2.1 – Os perfis de tensão nos barramentos da rede de teste de 14 barramentos

Para a obtenção dos perfis de tensão nos barramentos da rede de 14 barramentos foi usado um factor de crescimento de cargas α igual a 10^{-3} . O factor de crescimento de cargas corresponderá a um aumento de carga percentual de 0,1, entre FC sucessivos.

As cargas bases correspondentes ao primeiro FC são 2,59 e 0,735 pu, o que equivale, para uma base de potência de 100 MW/MVA, a 259 MW e 73,5 MVar, ver tabela A1.

Com esta rede foram necessários 761 FC para atingir o colapso, o que corresponde a um aumento das cargas de 76,1%, para um α igual a 10^{-3} . A realização desta simulação demorou 26 segundos, num PC Pentium IV a 2,4 GHz.

Na tabela 5.1 apresentam-se as tensões para a carga base e nos pontos de carga (PC) correspondentes a um crescimento de cargas de 10 %, 20 %, ..., 70%, e 76,1 % (último PC antes do colapso). As tensões a cheio correspondem às tensões referentes aos barramentos PV.

Nas figuras 5.3 e 5.4 apresentam-se os perfis de tensão nos barramentos da rede de 14 barramentos.

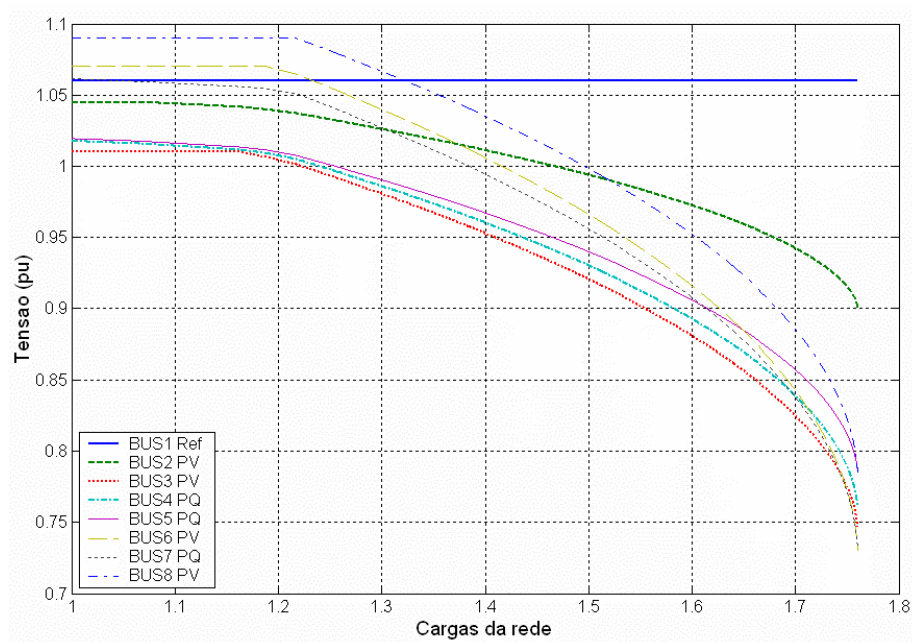
Nas curvas de tensão das figuras 5.3 e 5.4 podem-se caracterizar duas zonas:

- a primeira zona inicia-se no primeiro PC, correspondente à configuração de cargas base, e prolonga-se até ao PC 1.2, em que os crescimentos atingem 20 %. Este primeiro troço caracteriza-se por ter uma inclinação reduzida e praticamente linear;
- os restantes PC, até ao colapso, caracterizam uma segunda zona. Este segundo troço tem uma inclinação crescente, acentuando-se na parte final até ao ponto de colapso.

Tabela 5.1 – Tensões nos barramentos para vários PC (rede de 14 barramentos)

Barramento		Tensão para os aumentos de carga em (pu) (1)								
Nº	Tipo	Base	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	76,1 %
1	Ref.	1,060	1,060	1,060	1,060	1,060	1,060	1,060	1,060	1,060
2	PV	1,045	1,044	1,039	1,026	1,011	0,994	0,972	0,942	0,900
3	PV	1,010	1,010	1,004	0,981	0,953	0,921	0,881	0,825	0,746
4	PQ	1,018	1,014	1,007	0,986	0,960	0,930	0,893	0,839	0,760
5	PQ	1,020	1,016	1,010	0,991	0,967	0,940	0,906	0,857	0,785
6	PV	1,070	1,070	1,068	1,040	1,006	0,966	0,916	0,843	0,730
7	PQ	1,062	1,058	1,053	1,027	0,994	0,956	0,908	0,838	0,731
8	PV	1,090	1,090	1,090	1,067	1,035	0,998	0,952	0,886	0,785
9	PQ	1,056	1,051	1,044	1,015	0,978	0,936	0,882	0,805	0,684
10	PQ	1,051	1,046	1,039	1,009	0,972	0,929	0,874	0,795	0,672
11	PQ	1,057	1,054	1,049	1,020	0,984	0,941	0,888	0,811	0,691
12	PQ	1,055	1,053	1,050	1,019	0,983	0,940	0,887	0,808	0,687
13	PQ	1,050	1,048	1,043	1,012	0,975	0,932	0,877	0,797	0,673
14	PQ	1,036	1,030	1,022	0,989	0,949	0,903	0,844	0,759	0,625

(1) - Potência de base de 100 MVA

**Figura 5.3 – Perfis de tensão nos barramentos da rede de 14 barramentos (barramentos 1 a 8)**

Se é compreensível o abaixamento das tensões, nos barramentos PQ, devido a um aumento progressivo das quedas de tensão na rede, que caracteriza o primeiro troço, em consequência do aumento das intensidade de corrente nos ramos, já não é no segundo troço onde há um acentuado aumento da inclinação até ao colapso.

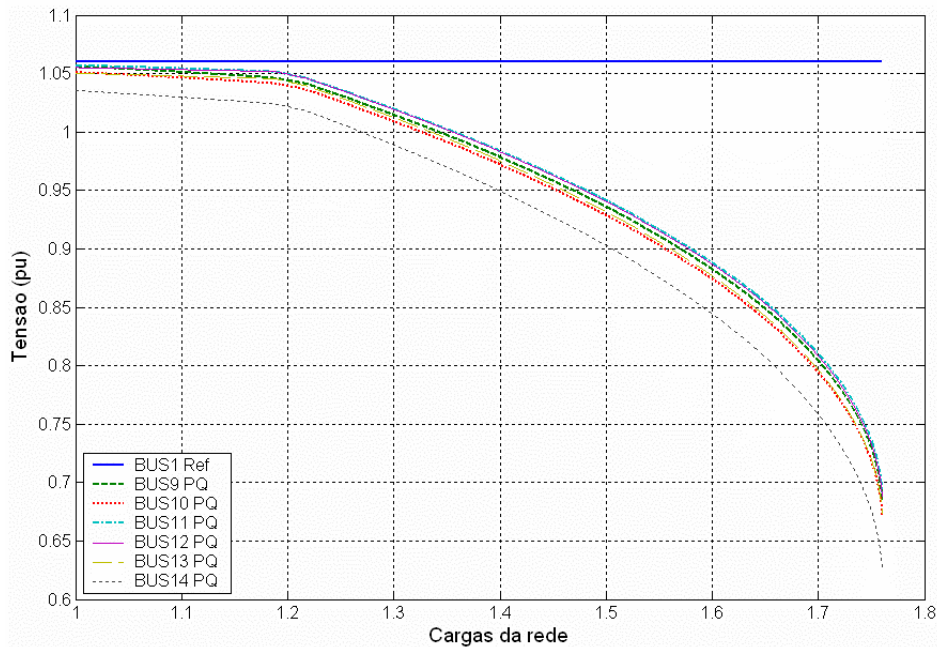


Figura 5.4 – Perfis de tensão nos barramentos da rede de 14 barramentos (barramentos Ref. e do 9 ao 14)

A questão é colocada da seguinte forma: o que é que influencia o andamento dos perfis de tensão? O que justifica o aparecimento dos pontos de quebra? No intuito de descobrir uma explicação para as questões colocadas, realizar-se-á uma análise à produção de energia reactiva pelos vários geradores dos barramentos PV. Procura-se assim, relacionar os limites de produção de energia reactiva com os pontos de quebra.

Na tabela 5.2 apresenta-se a caracterização dos PC onde ocorrem os limites de produção de energia reactiva nos geradores da rede de 14 barramentos.

Na figura 5.5 apresentam-se os pontos característicos das curvas de tensão dos barramentos PV, e na figura 5.6, os pontos característicos das curvas de produção dos geradores dos barramentos PV, ambas para a rede de 14 barramentos.

Uma análise cuidada à tabela 5.2 e às figuras 5.5 e 5.6 levam a concluir que:

- os pontos onde os geradores atingem os limites de produção de energia reactiva, ver tabela 5.2, e que correspondem aos pontos F, H, J, e L da figura 5.6, coincidem com os pontos A, B, C e D da figura 5.5, onde as tensões dos barramentos PV

passam a ter um comportamento de barramento PQ e a sua tensão passa a sofrer um decréscimo. Este abaixamento da tensão é devido à incapacidade do gerador de produzir a energia reactiva necessária para manter a tensão no valor constante que caracteriza os barramentos PV, por terem atingido o seu limite de produção;

Tabela 5.2 – Limites de produção de energia reactiva dos geradores da rede de simulação de 14 barramentos

Barramento		Limites de produção de energia reactiva		
Número	Tipo	Limite de produção (pu) (1)	Ponto de carga onde ocorre	
			FC (N.º de ordem)	Crescimento de cargas/ ponto de carga
2	PV	0,5	67	6,6% / 1.066
3	PV	0,4	165	16,4% / 1.164
6	PV	0,24	191	19% / 1.19
8	PV	0,24	219	21,9% / 1.219

(1) - Potência de base de 100 MVA

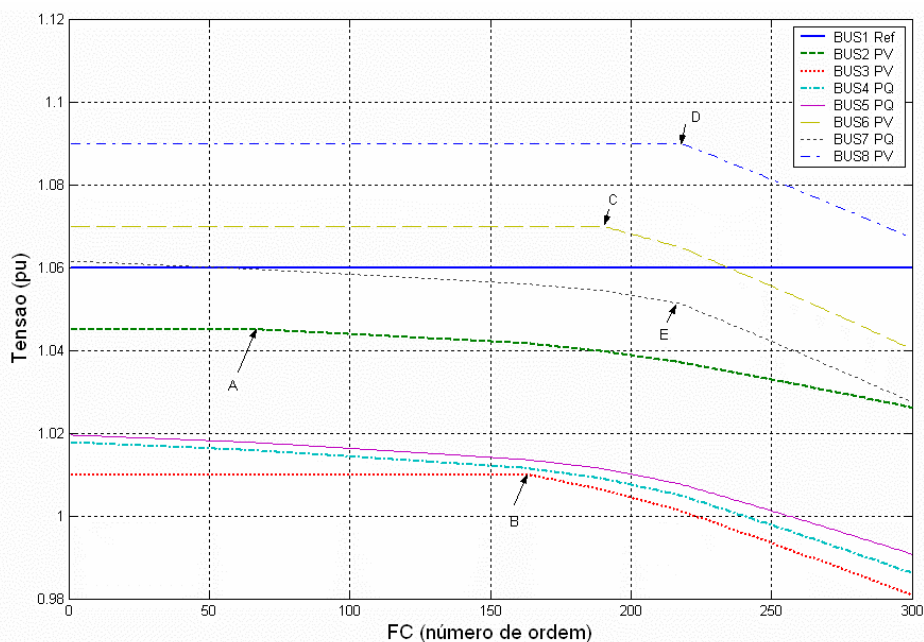


Figura 5.5 – Pontos característicos das curvas de tensão nos barramentos PV e barramento PQ (4, 5 e 7) da rede de 14 barramentos

- após um gerador ter atingido o seu limite de produção de energia reactiva, normalmente, pelo menos um dos outros geradores aumenta a produção de energia reactiva;

- como se pode ver na figura 5.6:
 - coincidindo com o limite de produção do gerador do barramento 2, ponto característico F, o gerador do barramento 3 aumenta a produção de energia reactiva, ponto característico G. Esta situação ocorre no FC N.º 67 (ver tabela 5.2);

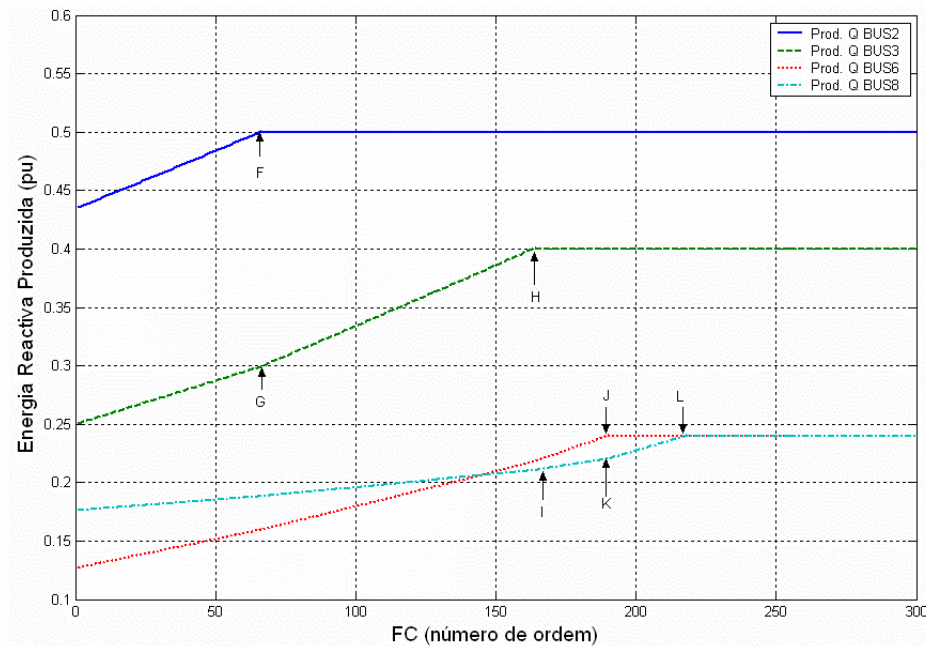


Figura 5.6 – Pontos característicos das curvas de produção de energia reactiva dos barramentos PV da rede de 14 barramentos

- já não é nítido o aumento de produção de energia reactiva nos outros dois geradores dos barramentos 6 e 8. Uma possível explicação para este facto é a de estes dois geradores dos barramentos 2 e 3 pertencerem ao mesmo escalão de tensão e diferente do primeiro gerador (ver figura 5.1);
- de igual forma, podemos associar o aumento de produção, mas quase imperceptível, do gerador do barramento 8, ponto característico I, ao limite de produção do gerador do barramento 3, ponto característico H, e que ocorre no FC N.º 165 (ver tabela 5.2);
- o aumento de produção de energia reactiva pelo gerador do barramento 8, ponto característico K, é claramente perceptível e coincide com o limite de produção do gerador do barramento 6, ponto característico J, que ocorre no FC N.º 191 (ver tabela 5.2);

- o aumento de inclinação das curvas das figuras 5.3, 5.4 e 5.5 está associado aos pontos onde os geradores atingem os limites de produção de energia reactiva, sendo muito mais acentuada a descida, após o ponto característico D (ver figura 5.5), em que todos os geradores já atingiram o seu limite de produção.

Do conteúdo das conclusões da análise realizada, para a rede de 14 barramentos, pode-se inferir, sem haver margem para dúvidas, que os pontos de quebra das curvas de tensão estão totalmente relacionados com os limites de produção de energia reactiva pelos geradores dos barramentos PV.

5.2.2 – Perfis de tensão nos barramentos da rede de testes de 57 barramentos

Para a obtenção dos perfis de tensão nos barramentos da rede de 57 barramentos foi usado um factor de crescimento de cargas α igual a 10^{-3} , igual ao que foi usado na simulação de 14 barramentos.

As cargas bases do primeiro FC são 12,508 e 3,364 pu, ou seja, 1250,8 MW e 336,4 MVar, com uma base de potência de 100 MW/MVA (ver tabela A3).

Até ao colapso realizaram-se 407 FC, o que corresponde a um aumento de cargas de 40,7%. Mesmo sendo uma rede de dimensão razoável, o tempo necessário para uma simulação, foi de 85 segundos, utilizando o mesmo PC da simulação efectuada para a rede de 14 barramentos.

Na tabela 5.3 apresentam-se as tensões nos barramentos PV, nos 10 barramentos com as tensões mais baixas no último FC, para os PC equivalentes aos crescimentos de cargas de 10 %, 20 %, ..., 40% e para o último PC, antes do colapso, que corresponde a um crescimento de cargas de 40,7 %. Na tabela C1 e C2, apresentam-se as listagens totais das tensões nos barramentos.

Na figura 5.7 apresentam-se as curvas de tensão nos barramentos Ref. e PV. Na figura 5.8, apresentam-se também, as curvas de tensão dos barramentos mais críticos, que serão analisados na secção subsequente. Ambas as figuras referem-se às tensões nos barramentos da rede de testes de 57 barramentos

Nas curvas de tensão das figuras 5.7 e 5.8 também se podem caracterizar duas zonas distintas:

- a primeira zona inicia-se no primeiro PC e prolonga-se até ao PC 1.35, que é um ponto de quebra devido à mudança súbita da inclinação das curvas;
- uma segunda zona inicia-se no PC 1.35 e prolonga-se até ao colapso.

O primeiro troço caracteriza-se por ter uma inclinação quase linear (ver figura 5.8) e o segundo por ter uma inclinação muito acentuada até ao ponto de colapso.

As interrogações colocadas após análise das curvas de tensão e referentes à rede de testes de 14 barramentos, também se aplicam às curvas de tensão da rede de testes de 57 barramentos. Concretamente e para a rede de 57 barramentos, o que origina o ponto de quebra que se verifica no ponto de carga 1,35 (ver figura 5.8), que altera completamente o andamento das curvas de tensão?

Tabela 5.3 – Tensões nos barramentos PV e as 10 piores tensões dos barramentos PQ no último PF (rede de testes de 57 barramentos)

Barramento		Tensão para os aumentos de carga em pu (1)					
Nº	Tipo	Base	10 %	20 %	30 %	40 %	40,7 %
1	Ref	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040
2	PV	1.010	1.010	1.010	1.008	0.987	0.983
3	PV	0.985	0.985	0.985	0.968	0.899	0.884
6	PV	0.980	0.980	0.980	0.968	0.880	0.860
8	PV	1.005	1.005	1.005	1.005	0.927	0.906
9	PV	0.980	0.976	0.965	0.948	0.856	0.834
12	PV	1.015	1.012	0.992	0.963	0.877	0.859
25	PQ	0.983	0.959	0.925	0.875	0.688	0.634
30	PQ	0.963	0.937	0.900	0.846	0.647	0.589
31	PQ	0.936	0.907	0.866	0.806	0.594	0.530
32	PQ	0.950	0.924	0.886	0.830	0.634	0.577
33	PQ	0.948	0.921	0.883	0.826	0.629	0.571
34	PQ	0.959	0.939	0.908	0.862	0.709	0.670
35	PQ	0.966	0.947	0.918	0.873	0.726	0.690
40	PQ	0.973	0.955	0.927	0.884	0.743	0.709
56	PQ	0.968	0.951	0.923	0.881	0.738	0.704
57	PQ	0.965	0.947	0.918	0.874	0.728	0.692
(1) - Potência de base de 100 MVA							

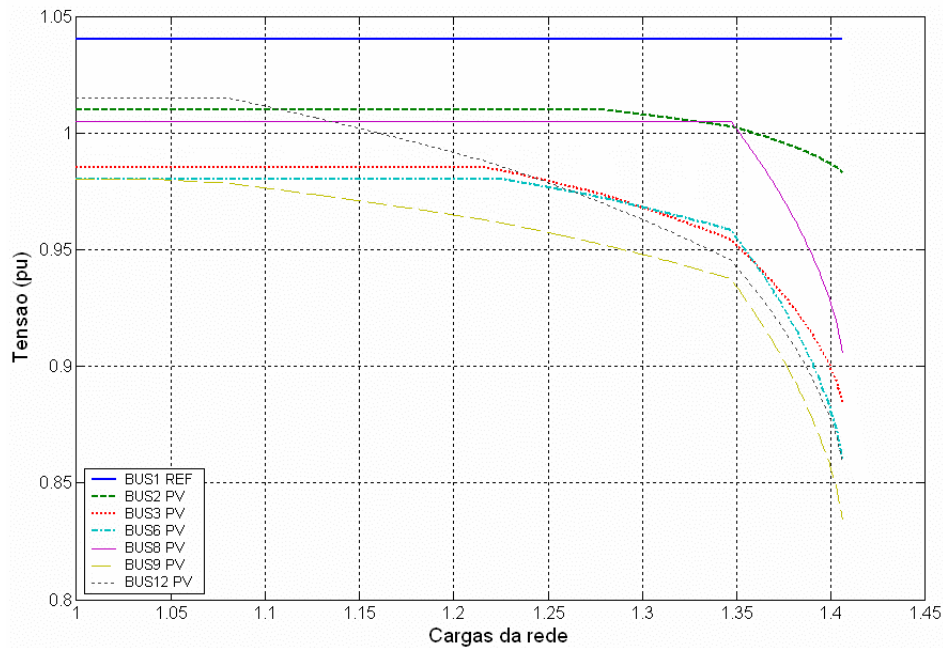


Figura 5.7 – Perfis de tensão nos barramentos Ref. e PV da rede de 57 barramentos

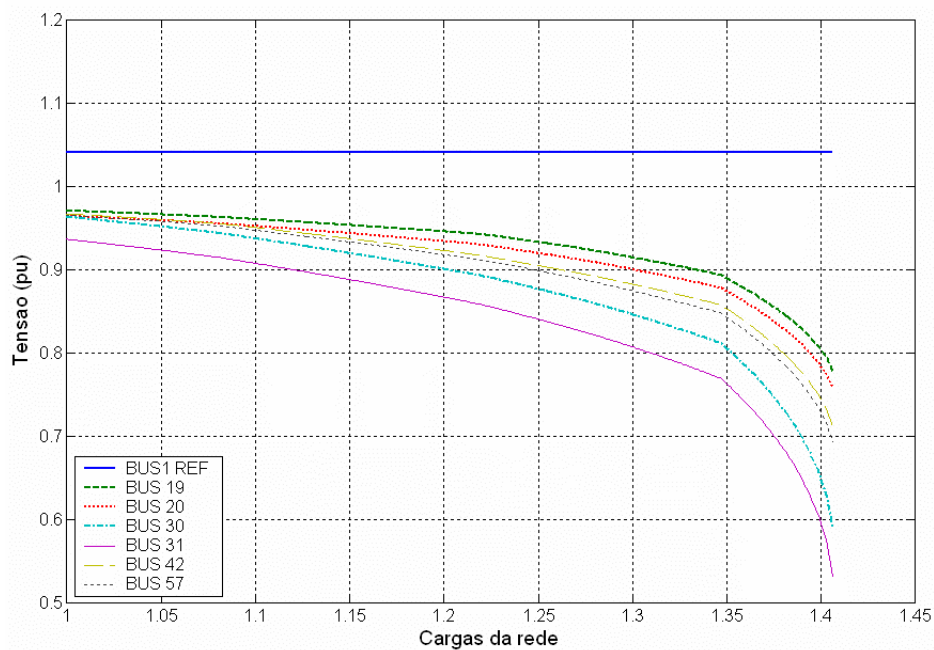


Figura 5.8 – Perfis de tensão nos barramentos críticos da rede de 57 barramentos

A metodologia de análise irá ser a mesma aplicada à rede de testes de 14 barramentos, para relacionar os limites de produção de energia reactiva com os pontos de quebra.

Na tabela 5.4 apresenta-se a caracterização dos pontos onde ocorrem os limites de produção de energia reactiva, assim como os valores dos respectivos limites de produção.

Na figura 5.9 apresentam-se os pontos característicos das curvas de tensão dos barramentos PV. Na figura 5.10 apresentam-se os pontos característicos das curvas de produção dos geradores dos barramentos PV. Ambas as figuras se referem às simulações com a rede de testes de 57 barramentos.

Tabela 5.4 – Limites de produção de energia reactiva para a rede de testes de 57 barramentos

Barramento		Limites de produção de energia reactiva		
Número	Tipo	Limite de produção (pu) (1)	Ponto de carga onde ocorre	
			FC (N.º de ordem)	Crescimento de cargas/ ponto de carga
2	PV	0,5	281	28% / 1.280
3	PV	0,6	219	21,8% / 1.218
6	PV	0,25	229	22,8% / 1.228
8	PV	2	349	34,8% / 1.348
9	PV	0,09	47	4,6% / 1.046
12	PV	1,55	83	8,2% / 1.082

(1) - Potência de base de 100 MVA

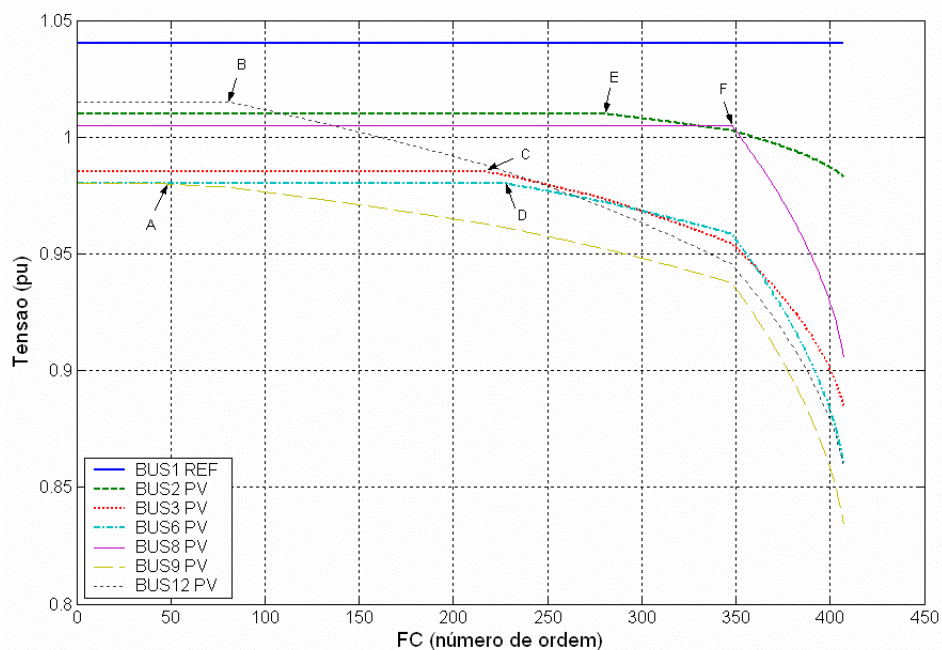


Figura 5.9 – Pontos característicos dos perfis de tensão nos barramentos PV da rede de 57 barramentos

Uma análise à tabela 5.4 e às figuras 5.9 e 5.10 levam a concluir que:

- os pontos onde os geradores atingem os limites de produção de energia reactiva, ver tabela 5.4, e que correspondem aos pontos G, I, L, N, P e Q da figura 5.10, coincidem com os pontos A, B, C, D, E e F da figura 5.9, onde as tensões dos barramentos PV passam a ter um comportamento de barramento PQ e a sua tensão passa a sofrer um decréscimo;

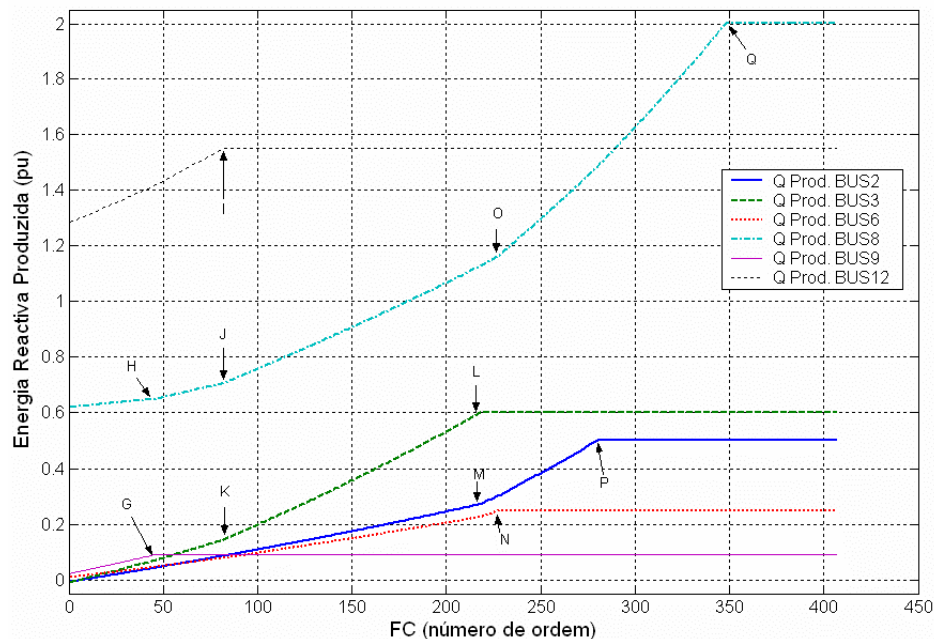


Figura 5.10 – Pontos característicos das curvas de produção de energia reactiva dos geradores dos barramentos PV da rede de 57 barramentos

- a partir do momento que um gerador atinge o limite de produção de energia reactiva, é nítido que pelo menos um dos outros geradores aumenta a produção de energia reactiva. Esta situação pode ser verificada na figura 5.10, onde:
 - coincidindo com o limite de produção do gerador do barramento 9, ponto característico G, o gerador do barramento 8 aumenta a produção de energia reactiva, ponto característico H, que ocorre no FC N.º 47;
 - com o limite de produção do gerador do barramento 12, ponto característico I, e que ocorre no FC N.º 83, os geradores dos barramentos 3 e 8 aumentam de produção, pontos característicos J e K;
 - com o limite de produção do gerador do barramento 3, ponto característico L, que se verifica no FC N.º 219, o gerador do barramento 2 aumenta de produção, ponto característico M;

-
- com o limite de produção do gerador do barramento 6, FC Nº 229, ponto característico N, o gerador do barramento 8 aumenta de produção, ponto característico O;
 - o aumento de produção de energia reactiva, por outros geradores, quando um dos geradores atinge o seu limite de produção, compensa, parcialmente, a perda de capacidade de produção;
 - quando o limite de produção do gerador do barramento 8 é atingido, ponto característico Q, e sendo o último, deixa de haver possibilidade de aumentar a produção de energia reactiva;
 - a partir do ponto característico Q, continuando a carga a aumentar, as inclinações das curvas de tensões acentuam-se, atingindo-se rapidamente o colapso.

A análise dos resultados das simulações com as redes de teste de 14 e 57 barramentos levam às mesmas conclusões. Os andamentos das curvas de tensão são totalmente dependentes dos limites de produção de energia reactiva. A partir do momento em que todos os geradores atingem os seus limites, e não havendo possibilidade de aumentar a produção de energia reactiva, rapidamente é atingido o colapso de tensão na rede de testes. Este facto é mais penalizante na rede de testes de 57 barramentos, a partir deste ponto e com unicamente um crescimento de 5,8 % de cargas é atingido o colapso, contra 54,2 % para a primeira rede.

A detecção dos barramentos que entram em primeiro lugar em colapso, por isso considerados barramentos críticos, é outro aspecto importante e que será analisado na secção seguinte.

5.3 – A identificação dos barramentos críticos

A identificação dos barramentos críticos nas redes eléctricas é muito importante para o planeamento e exploração das redes. Para o planeamento é importante para a definição do plano estratégico de investimentos. Com este plano, o planeamento define soluções no sentido de reforçar as redes eléctricas com a finalidade de anular pontos críticos existentes, ou que se preveja o seu aparecimento com a expansão da rede, a curto ou médio prazo.

Para a exploração para permitir o estudo de transferências de cargas no sentido de anular as tensões baixas, caso hajam.

Os factores de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ são os valores da diagonal da submatriz jacobiana J22, ver equação 2.37. Este factor de sensibilidade permite detectar os barramentos, de uma rede eléctrica, que entram primeiro em colapso, ou seja, os barramentos que tiverem menor valor da derivada são os primeiros barramentos a entrar em colapso.

5.3.1 – Identificação dos barramentos críticos da rede de testes de 14 barramentos

Nas figuras 5.11 e 5.12 apresentam-se as curvas dos coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ dos barramentos da rede de 14 barramentos.

Na tabela 5.5 apresentam-se os coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ e as tensões dos barramentos referentes ao FC anterior ao colapso relativos à mesma rede.

Como podemos ver na figura 5.11 e tabela 5.5, o barramento 14 tem o menor coeficiente de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ e o menor valor de tensão, no último FC antes do colapso. O segundo menor valor do coeficiente de sensibilidade refere-se ao barramento 12. O barramento 14, ao ter o valor mais baixo do coeficiente de sensibilidade atingirá primeiro o colapso, seguido do barramento 12. Estes dois barramentos, 12 e 14, pertencem ao escalão mais baixo de tensão e localizam-se no extremo desta rede de simulação, ver figura 5.1.

Outro aspecto a realçar é o facto de as curvas, destes coeficientes de sensibilidade, se manterem sempre, com a mesma posição relativa, em relação umas às outras.

Os valores dos coeficientes de sensibilidade dos barramentos PV têm um valor constante até serem alcançados os limites de produção de energia reactiva, ver figura 5.12. O barramento 8, mesmo sendo PV, tem o terceiro coeficiente de sensibilidade mais baixo. Não se pode dissociar este facto, do facto de pertencer ao escalão mais baixo, ver figura 5.1.

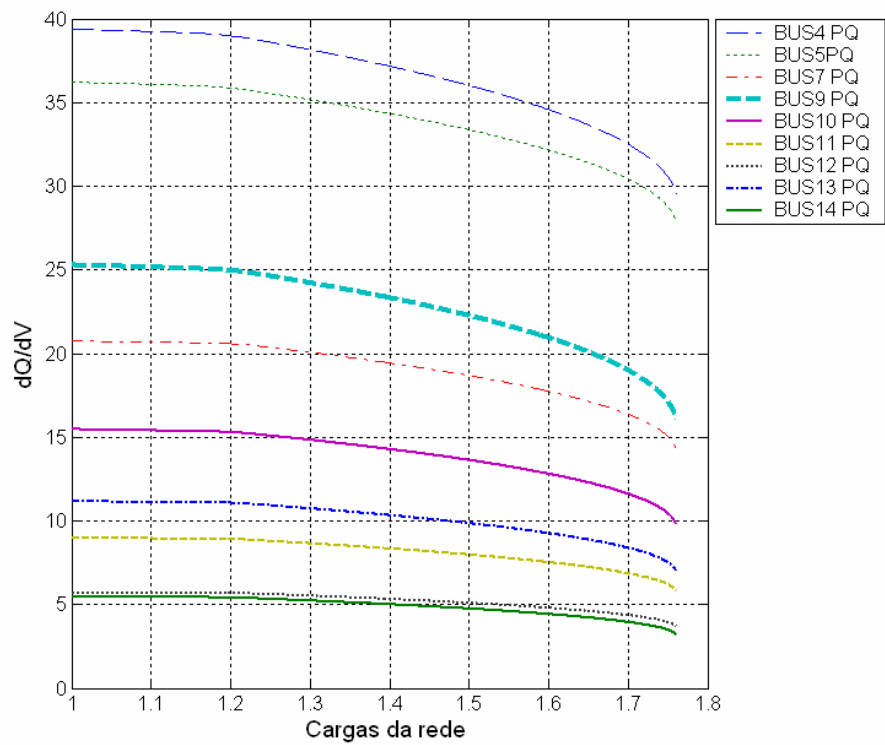


Figura 5.11 – Curvas dos coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ dos barramentos PQ da rede de simulação de 14 barramentos

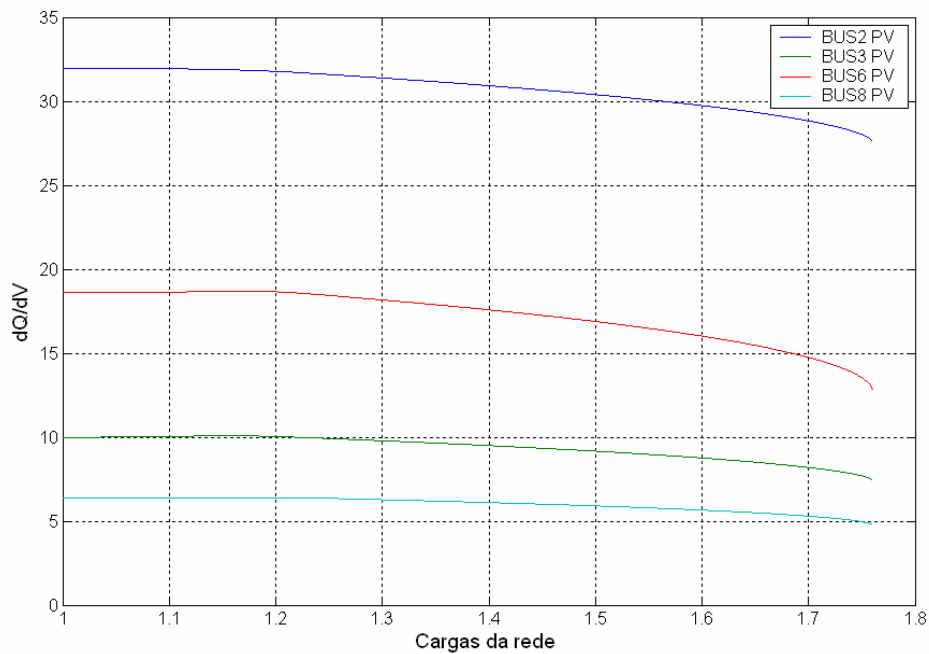


Figura 5.12 – Curvas dos coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ dos barramentos PV da rede de simulação de 14 barramentos

Tabela 5.5 – Coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ e tensões dos barramentos PQ referentes ao FC anterior ao colapso (rede de simulação de 14 barramentos)

Barramento		$\partial Q_i/\partial V_i$	Tensão (pu)
Número	Tipo		
2	PV	27,571	0,90047
3	PV	7,4227	0,74644
6	PV	12,814	0,72992
8	PV	4,764	0,78489
4	PQ	29,489	0,76025
5	PQ	27,884	0,78545
7	PQ	14,300	0,73103
9	PQ	16,075	0,68442
10	PQ	9,7794	0,67196
11	PQ	5,8302	0,69104
12	PQ	3,6926	0,68733
13	PQ	7,0315	0,67271
14	PQ	3,2035	0,62522

5.3.2 – A identificação dos barramentos críticos da rede de testes de 57 barramentos

Na tabela 5.6 apresentam-se os valores dos seis coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ mais baixos dos barramentos da rede de 57 barramentos, referentes ao FC anterior ao colapso, assim como também as respectivas tensões nos mesmos barramentos. Estes barramentos ao terem os valores mais baixos do coeficiente de sensibilidade são considerados os mais críticos.

Na figura 5.13 apresentam-se as curvas dos coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ referentes aos seis barramentos críticos da rede de 57 barramentos.

Tabela 5.6 – Os seis coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ mais baixos e respectivas tensões referentes à rede de simulação de 57 barramentos

Barramento		$\partial Q_i/\partial V_i$	Tensão
Número	Tipo		(pu)
31	PQ	1,1526	0,5297
19	PQ	2,0290	0,7780
20	PQ	2,1792	0,7566
57	PQ	2,3095	0,6922
30	PQ	2,8031	0,5891
42	PQ	2,8882	0,7104

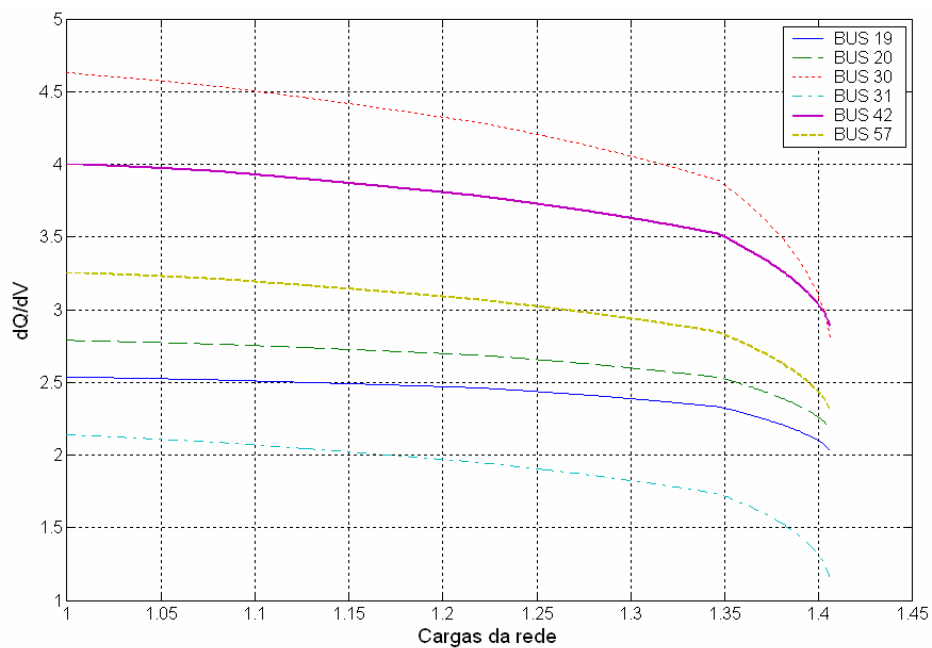


Figura 5.13 – Curvas dos seis coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ mais baixos referentes à rede de simulação de 57 barramentos

O barramento com menor coeficiente de sensibilidade é o barramento PQ 31 que devido a esta circunstância será o primeiro a entrar em colapso. Este barramento também tem a tensão com menor valor.

5.4 – UM NOVO MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DO COLAPSO DE TENSÃO

5.4.1 – A grandeza FSQV

Na secção precedente foram calculados os factores de sensibilidade $\delta Q/\delta V$. Estes factores são os valores da diagonal da submatriz jacobiana J22, ver equação 2.37. Com todos os valores da diagonal, da mesma submatriz, é realizada a sua soma. Ao valor encontrado foi chamado o acrónimo FSQV, que são as iniciais de *Full Sum $\delta Q/\delta V$* . Para este FC contínuo foi utilizado um factor de crescimento de cargas α igual a 10^{-3} , já usado anteriormente.

Na tabela 5.7 apresentam-se os coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ dos barramentos da rede de simulação de 14 e valores da grandeza FSQV, em vários pontos de carga.

Tabela 5.7 – Coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ dos barramentos e valores da grandeza FSQV para a rede de 14 barramentos

Barramento		FC (número de ordem)						
Número	Tipo	1	200	400	600	700	761	Var. (%) ¹
1	Ref	20,4580	20,5050	21,0530	21,8690	22,5280	23,4990	14,8646
2	PV	31,9300	31,7800	30,9320	29,7500	28,8430	27,5710	-13,6517
3	PV	9,9808	10,0370	9,5033	8,7664	8,2045	7,4227	-25,6302
4	PQ	39,3760	38,9900	37,1870	34,5950	32,5410	29,4890	-25,1092
5	PQ	36,2110	35,8720	34,3570	32,1790	30,4510	27,8840	-22,9958
6	PV	18,6030	18,6620	17,5870	16,0260	14,7660	12,8140	-31,1186
7	PQ	20,7520	20,5900	19,4480	17,7600	16,3990	14,3000	-31,0910
8	PV	6,3496	6,3967	6,1111	5,6611	5,3037	4,7640	-24,9717
9	PQ	25,2830	24,9650	23,3440	20,9740	19,0590	16,0750	-36,4197
10	PQ	15,4660	15,2820	14,2780	12,8120	11,6270	9,7794	-36,7684
11	PQ	8,9635	8,8954	8,3352	7,5192	6,8590	5,8302	-34,9562
12	PQ	5,7123	5,6792	5,3157	4,7881	4,3606	3,6926	-35,3570
13	PQ	11,1520	11,0650	10,3280	9,2571	8,3897	7,0315	-36,9485
14	PQ	5,4856	5,4022	5,0024	4,4209	3,9487	3,2035	-41,6016
FSQV		255,7228	254,1215	242,7817	226,3778	213,2802	193,3559	-24,3885
¹ – Variação entre o valor do 1º FC e o último FC (Nº 761)								

Os valores dos coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ variam todos no mesmo sentido, ou seja, todos têm incrementos negativos, com exceção do barramento de referência em que o incremento é positivo. Em termos percentuais o coeficiente que tem maior variação negativa é o barramento 14 (-41,6016), que coincide também com o menor valor inicial (5,4856) e final (3,2035), sendo por esta razão, o primeiro barramento a entrar em colapso. O barramento de referência tem uma variação de 14,8646 % entre o primeiro FC e o último (ver tabela 5.7).

O primeiro valor FSQV é 255,7228, decrescendo progressivamente até que o valor antes do colapso é de 193,3559. O valor da grandeza FSQV tem uma variação de 24,3885 % entre o primeiro FC e o último (ver tabela 5.7).

Na figura 5.14 apresenta-se a curva FSQV para a rede de 14 barramentos. O ponto A, da mesma figura, corresponde ao ponto de colapso.

Comparando a curva FSQV da figura 5.14 com as curvas das tensões dos barramentos PQ da figura 5.4, encontram-se semelhanças nos andamentos das curvas. No entanto, como se pode ver na figura 5.11, as curvas dos coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$, para os barramentos PQ da mesma rede, são bastante diferentes.

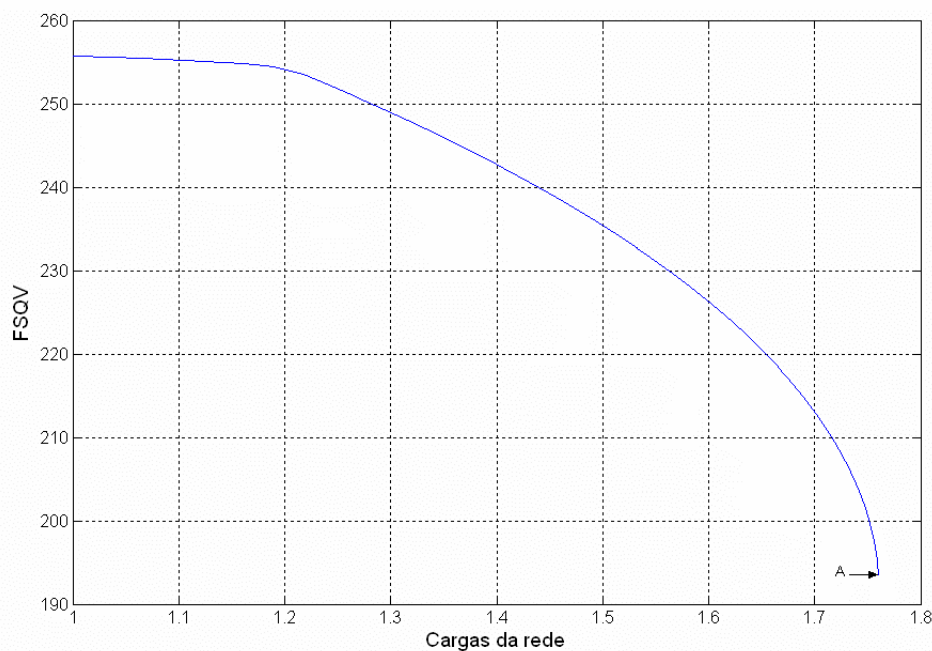


Figura 5.14 – Curva FSQV para a rede de 14 barramentos

A curva FSQV, à semelhança das curvas da figura 5.4, tem duas zonas distintas: a primeira zona, praticamente em patamar, até ao ponto de carga 1,2; e a segunda, com uma inclinação progressiva, até ao ponto de colapso. Na primeira zona todos os geradores atingem os seus limites de produção (ver tabela 5.2). A análise realizada na secção 5.2 aos pontos característicos das curvas de tensão, da rede de testes de 14 barramentos, é válido para a nova curva FSQV, já que as curvas são semelhantes, mas havendo outra ordem de grandeza nas ordenadas.

A questão que se coloca agora é a seguinte: será que com outra rede de testes, por exemplo de 57 barramentos, teremos os mesmos resultados?

Utilizando a mesma metodologia que foi utilizada para a rede de 14 barramentos, realizar-se-á um FC contínuo para a rede de 57 barramentos.

Na tabela 5.8 apresentam-se os valores FSQV para a rede de 57 barramentos, em vários pontos de carga. Na tabela C3 apresentam-se os coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ dos barramentos, assim como o seu somatório, valores da grandeza FSQV, para a rede de simulação de 57 barramentos.

Tabela 5.8 – Valores da grandeza FSQV para a rede de 57 barramentos

FC (número de ordem)					
1	100	200	300	400	407
1467,07	1455,32	1433,11	1395,41	1252,54	1213,81

Na figura 5.15 apresenta-se a curva FSQV para a rede de 57 barramentos.

Comparando a curva FSQV da figura 5.15 com as curvas das tensões dos barramentos PQ, ver figura 5.8, também se pode concluir que o andamento da grandeza FSQV na primeira curva, é muito semelhante ao andamento das referidas curvas de tensão da mesma rede de simulação.

Na figura 5.16 apresentam-se os pontos de quebra, considerados pontos característicos, que se podem detectar na curva FSQV da rede de teste de 57 barramentos. Estes pontos de quebra definem o andamento desta curva e, por isso, é importante analisá-los, recorrendo à análise realizada na secção 5.2 e referente à mesma rede de testes.

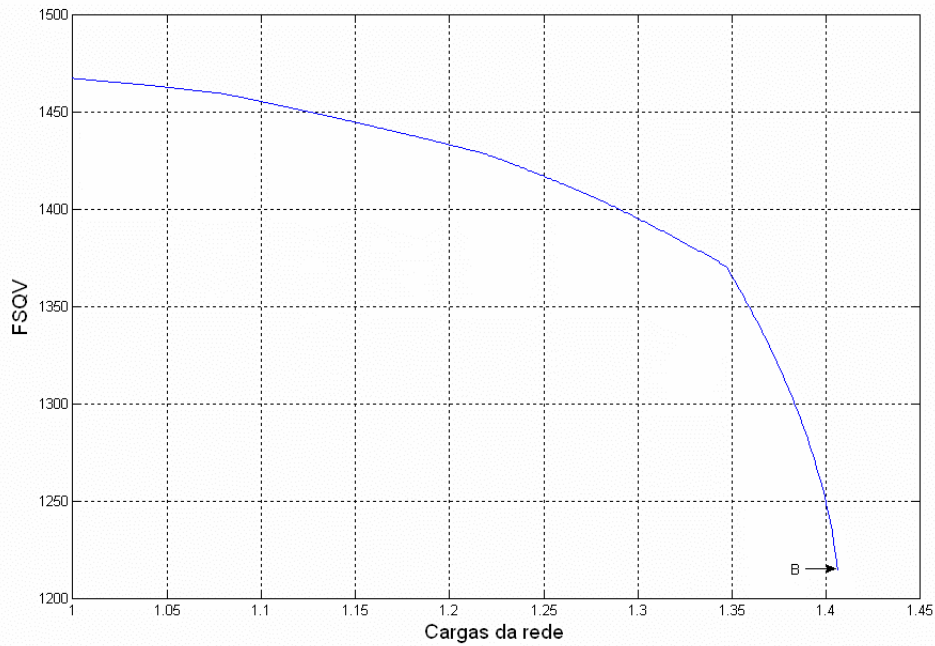


Figura 5.15 – Curva FSQV para a rede de 57 barramentos

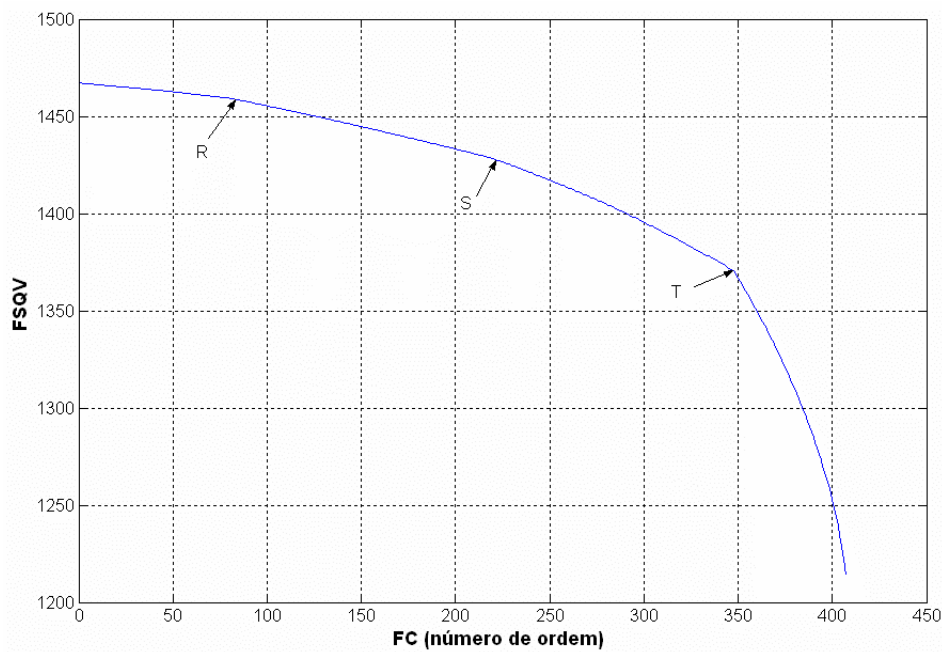


Figura 5.16 – Pontos característicos da curva FSQV para a rede de 57 barramentos

Os pontos característicos da figura 5.16 coincidem com os limites de produção de energia reactiva (ver tabela 5.4), ou seja:

- o ponto R coincide com o limite de produção do barramento 12 (1,55 pu) no FC 83;

- o ponto S coincide com o limite de produção do barramento 3 (0,6 pu) no FC 219;
- o ponto T, o mais importante, coincide com o limite de produção, do gerador com maior produção de energia reactiva, 2 pu, localizado no barramento 8 e que ocorre no FC 349.

Outra análise que é importante realizar é comparar as duas curvas FSQV referentes às duas redes utilizadas.

Os valores da grandeza FSQV são diferentes para as duas redes:

- 255,72 (inicial) e 193,36 (final) para a rede de 14 barramentos;
- 1467,1 (inicial) e 1213,8 (final) para a rede de 57 barramentos.

A primeira relação que se consegue encontrar é entre a dimensão dos valores iniciais e finais e o número de barramentos da rede de testes. Os valores FSQV aumentam com a dimensão da rede porque sendo um somatório de $\delta Q/\delta V$, naturalmente que aumenta com o número de barramentos.

Neste momento só é possível concluir que as duas curvas FSQV:

- têm um andamento muito parecido com o andamento das curvas de tensão dos barramentos PQ, mas noutra escala de valores;
- têm pontos característicos que se podem relacionar com os limites de produção de energia reactiva dos geradores dos barramentos PV, à semelhança do que se passa com as curvas PV dos barramentos PQ;
- podem ser utilizadas como um indicador da singularidade da matriz jacobiana, concretamente o seu último ponto.

A questão que se coloca é a seguinte: como se comporta a curva FSQV com vários cenários de carga?

Na próxima secção serão apresentadas várias simulações com vários cenários de carga para aprofundar a análise desta nova grandeza, FSQV.

5.4.2 – Curvas FSQV com vários cenários de carga

Rede de testes de 14 barramentos

Para a realização de simulações serão definidos vários cenários de crescimento de carga. O primeiro cenário de cargas, A1, corresponderá ao cenário com cargas base, em que todos os barramentos têm um factor α igual e constante. Nos restantes cenários serão diferenciados os factores α e divididos em dois grupos. Num primeiro grupo, os barramentos com cargas reactivas base mais altas (barramentos 2 e 3), e num segundo grupo, os dois barramentos críticos, 12 e 14, irão ter um factor de crescimento de cargas superior ao dos restantes barramentos da rede de testes. A intenção é criar situações que do ponto de vista de cargas sejam as mais penalizantes.

Na tabela 5.9 apresentam-se os cenários de cargas A1 a A9 definidos para a rede de 14 barramentos. Na tabela 5.10 apresentam-se os quatro últimos valores da grandeza FSQV, número de FC necessários para atingir o colapso e respectivo PMC para cada cenário de crescimento de cargas.

Tabela 5.9 – Cenários de cargas A1 a A9 para a rede de 14 barramentos

Cenário de carga	α base	Excepções		
		Barramentos	α	Observações
A1	0,001	-	-	-
A2	0,001	2 e 3	0	carga constante
A3	0,001	2 e 3	0,0012	mais 20 % de carga
A4	0,001	2 e 3	0,0015	mais 50 % de carga
A5	0,001	2 e 3	0,0020	mais 100 % de carga
A6	0,001	12 e 14	0	carga constante
A7	0,001	12 e 14	0,0012	mais 20 % de carga
A8	0,001	12 e 14	0,0015	mais 50 % de carga
A9	0,001	12 e 14	0,0020	mais 100 % de carga

Tabela 5.10 – Quatro últimos valores FSQV para os cenários A1 a A9 para a rede de 14 barramentos

Cenário de carga	Último FC-3	Último FC-2	Último FC-1	Último FC	Erro (a) (%)	Número FC (b)	PMC (%) (c)
A1	196,83	196,05	195,13	193,36	-	761	76
A2	198,12	197,57	196,75	195,96	1,34	759	75,9
A3	197,61	196,60	195,66	194,18	0,42	634	76
A4	198,46	197,46	196,41	194,92	0,81	507	75,9
A5	199,68	198,67	197,58	195,96	1,34	380	75,8
A6	196,82	195,92	195,00	193,55	0,10	761	76
A7	197,46	196,65	195,54	194,43	0,55	634	76
A8	198,38	197,49	196,35	195,04	0,87	507	75,9
A9	200,59	199,70	198,75	197,46	2,12	379	75,6
(a) - Erro calculado com os valores FSQV referentes ao último FC em relação ao cenário A1 (b) – Número de FC necessários para atingir o colapso (c) – PMC tendo por referência a carga base desta rede							

Na tabela 5.11 apresentam-se os crescimentos percentuais, gerais e dos barramentos exceção (ver tabela 5.9), para os cenários de cargas A1 a A9 para a rede de simulação de 14 barramentos.

Tabela 5.11 – Crescimento percentual das cargas para os cenários A1 a A9 para a rede de 14 barramentos

Cenário de carga	Crescimento de cargas (%)		PMC (%) (a)
	Geral	Barramentos exceção	
A1	76,00	76,00	76
A2	75,90	0	75,9
A3	63,30	75,96	76
A4	50,70	75,90	75,9
A5	37,90	75,80	75,8
A6	76,00	0	76
A7	63,30	75,96	76
A8	50,60	75,90	75,9
A9	37,80	75,60	75,6
(a) – PMC tendo por referência a carga base desta rede			

Analisando as tabelas 5.9, 5.10 e 5.11, pode-se concluir que:

- o número de FC necessários para atingir o colapso vai depender do valor escolhido para o factor α dos barramentos excepção (ver tabela 5.9), ou seja, quanto mais alto for este factor, menor será o número de FC necessários para atingir o colapso. Isto significa que o crescimento de cargas que vai influenciar o PMC vai ser o dos barramentos excepção;
- é possível relacionar o número de FC necessários para atingir o colapso e o factor α geral, por exemplo: no cenário A3 atingiu-se o colapso com 634 FC e o crescimento de cargas geral foi de 63,3 %. Esta relação pode-se estabelecer com todos os cenários onde houve crescimentos diferenciados;
- os erros dos últimos valores FSQV dos cenários A2 a A9, em relação ao valor FSQV do cenário A1, aumentam com o aumento do factor α dos barramentos excepção;
- o erro máximo é de 2,12 % e corresponde ao cenário A9;

A mais importante conclusão é a de se poder detectar o ponto de colapso, já que para as condições definidas, o erro máximo é 2,12 %, que é perfeitamente aceitável.

Estes importantes resultados levam a colocar, de seguida, a questão: o que acontecerá se se aplicar a mesma metodologia de cenários de cargas à rede de 57 barramentos?

Rede de testes de 57 barramentos

Para as simulações com a rede de 57 barramentos a metodologia seguida foi a mesma, ou seja, foram definidos vários cenários de crescimento de carga. O primeiro cenário de carga, B1, corresponde ao cenário com cargas base em que todos os barramentos têm um α igual e constante. Os restantes cenários foram também divididos em dois grupos. O primeiro grupo, que corresponde aos barramentos com carga mais elevadas, é constituído pelos barramentos 2 e 3. O segundo grupo corresponde aos barramentos críticos, 19, 20, 30, 31, 42 e 57, analisados na secção 5.3.

Na tabela 5.12 apresentam-se os cenários de cargas B1 a B11, definidos para a rede de 57 barramentos. Na tabela 5.13 apresentam-se os quatro últimos valores da grandeza FSQV, resultados das simulações efectuadas com os cenários de cargas referidos acima.

Na figura 5.17 apresentam-se os últimos 15 valores da grandeza FSQV, antes do colapso, referentes aos FC efectuados com os cenários referidos acima para a rede de 57 barramentos.

Tabela 5.12 – Cenários de cargas B1 a B11 para a rede de 57 barramentos

Cenário de carga	α Base	Excepções		
		Barramentos	α	Observações
B1	0,001	-	-	-
B2	0,001	2 e 3	0	carga constante
B3	0,001	2 e 3	0,0015	mais 50 % de carga
B4	0,001	2 e 3	0,0020	Mais 100 % de carga
B5	0,001	2 e 3	0,0025	Mais 150 % de carga
B6	0,001	2 e 3	0,0030	Mais 200 % de carga
B7	0,001	19, 20, 30, 31, 42 e 57 (a)	0	Carga constante
B8	0,001	19, 20, 30, 31, 42 e 57 (a)	0,0015	Mais 50 % de carga
B9	0,001	19, 20, 30, 31, 42 e 57 (a)	0,0020	Mais 100 % de carga
B10	0,001	19, 20, 30, 31, 42 e 57 (a)	0,0025	Mais 150 % de carga
B11	0,001	19, 20, 30, 31, 42 e 57 (a)	0,0030	Mais 200 % de carga
(a) – Barramentos críticos				

Analisando os resultados das 11 simulações apresentados na tabela 5.13, pode-se concluir que:

- também se verificam as duas primeiras conclusões da análise efectuada às simulações com a rede de 14 barramentos;
- os erros dos últimos valores FSQV dos cenários B2 a B11, em relação ao valor FSQV do cenário B1, aumentam com o crescimento do α dos barramentos excepção;
- o erro máximo é de 0,7 e corresponde aos cenários B6 e B11.

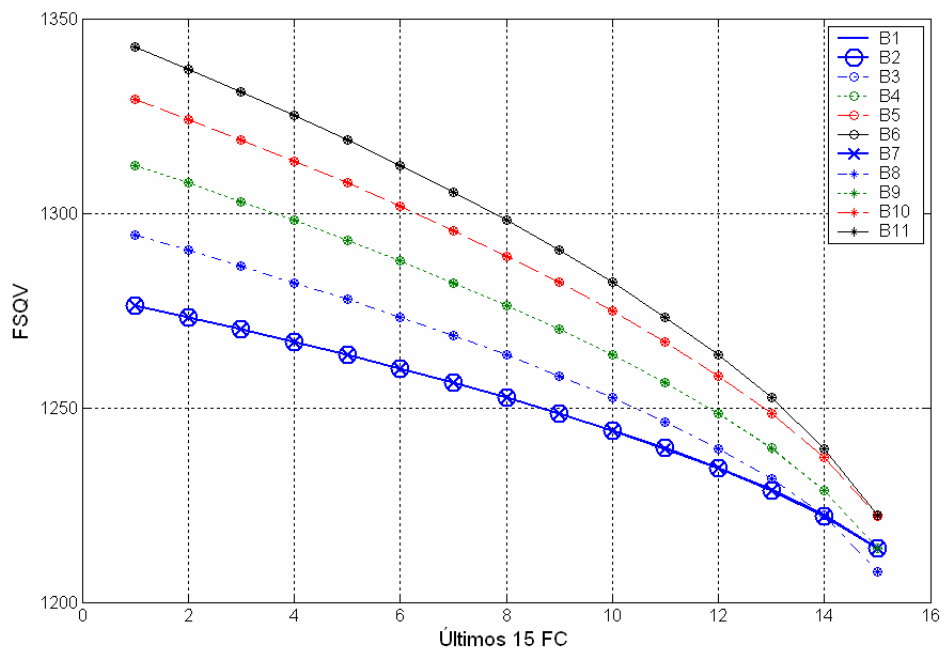
Na rede com 14 barramentos o erro máximo era de 2,12 % para o aumento de cargas de 100% dos barramentos críticos, mas para a rede de testes de 57 barramentos o erro máximo é de 0,7 %, para as duas situações extremas, agora com aumentos de cargas de 200 %.

Estes resultados abrem uma nova perspectiva para a grandeza FSQV. Até aqui era unicamente considerada como um indicador de singularidade, mas perante os resultados apresentados, tem que se considerar que é possível detectar o ponto de colapso através da análise do valor da grandeza FSQV.

Tabela 5.13 – Quatro últimos FSQV para os cenários B1 a B11 (rede de simulação de 57 barramentos)

Cenário de carga	Último FC-3	Último FC-2	Último FC-1	Último FC	Erro (a) (%)	Quant. FC (b)	PMC (c)
B1	1234,5	1228,9	1222,3	1213,8		407	40,60
B2	1234,5	1228,8	1222,2	1213,8	0,00	407	40,60
B3	1239,5	1231,7	1222,3	1207,7	-0,50	272	40,65
B4	1248,4	1239,6	1228,8	1213,8	0,00	204	40,60
B5	1258,2	1248,5	1237,1	1222,1	0,68	163	40,50
B6	1263,5	1252,5	1239,5	1222,3	0,70	136	40,50
B7	1234,5	1228,8	1222,2	1213,8	0,00	407	40,60
B8	1239,5	1231,7	1222,3	1207,7	-0,50	272	40,65
B9	1248,5	1239,5	1228,8	1213,8	0,00	204	40,60
B10	1258,2	1248,5	1237,1	1222,2	0,69	163	40,50
B11	1263,5	1252,5	1239,5	1222,3	0,70	136	40,50

(a) - Erro calculado com os valores FSQV referentes ao último FC em relação ao cenário A1
(b) – Quantidade de FC necessários para atingir o colapso
(c) – PMC tendo por referência a carga base desta rede

**Figura 5.17 – Valores dos últimos 15 valores FSQV para a rede de 57 barramentos**

Ao analisar a tabela 5.13, pode-se também concluir que:

- os cenários B1 a B11 podem-se dividir em cinco grupos, em que os valores FSQV são praticamente iguais, onde foi necessário o mesmo número de FC para atingirem o colapso. Os cenários ficam agrupados da seguinte forma:
 - grupo 1 é constituído pelos cenários B1, B2 e B7, 407 FC;
 - grupo 2 é constituído pelos cenários B3 e B8, 272 FC;
 - grupo 3 é constituído pelos cenários B4 e B9, 204 FC;
 - grupo 4 é constituído pelos cenários B5 e B10, 163 FC;
 - grupo 5 é constituído pelos cenários B6 e B11, 136 FC;
- o agrupamento que se verifica não é aleatório, ou seja:
 - o grupo 1 corresponde ao cenário base ou à carga constante nos barramentos excepção;
 - o grupo 2 corresponde aos cenários com aumentos de carga nos barramentos excepção de 50 %;
 - o grupo 3 corresponde aos cenários com aumentos de carga nos barramentos excepção de 100 %;
 - o grupo 4 corresponde aos cenários com aumentos de carga nos barramentos excepção de 150 %;
 - o grupo 5 corresponde aos cenários com aumentos de carga nos barramentos excepção de 200 %;
- outro aspecto interessante a salientar é a existência de erros iguais dentro de cada grupo, ou seja:
 - no grupo 1 o erro é zero;
 - no grupo 2 o erro é -0,5 %;
 - o grupo 3 o erro é zero %;
 - o grupo 4 o erro é 0,68 e 0,69 %;
 - o grupo 5 o erro é 0,70 %.

Na figura 5.17 apresentaram-se os últimos 15 valores FSQV pela simples razão de que o que era importante, nessa altura, era comparar os valores FSQV finais. No entanto, agora a questão que se levanta é de se saber se é possível comparar as 11 curvas FSQV.

Na figura 5.18 apresentam-se as 11 curvas FSQV, referentes às 11 simulações realizadas com os 11 cenários definidos na tabela 5.12, para a rede de 57 barramentos.

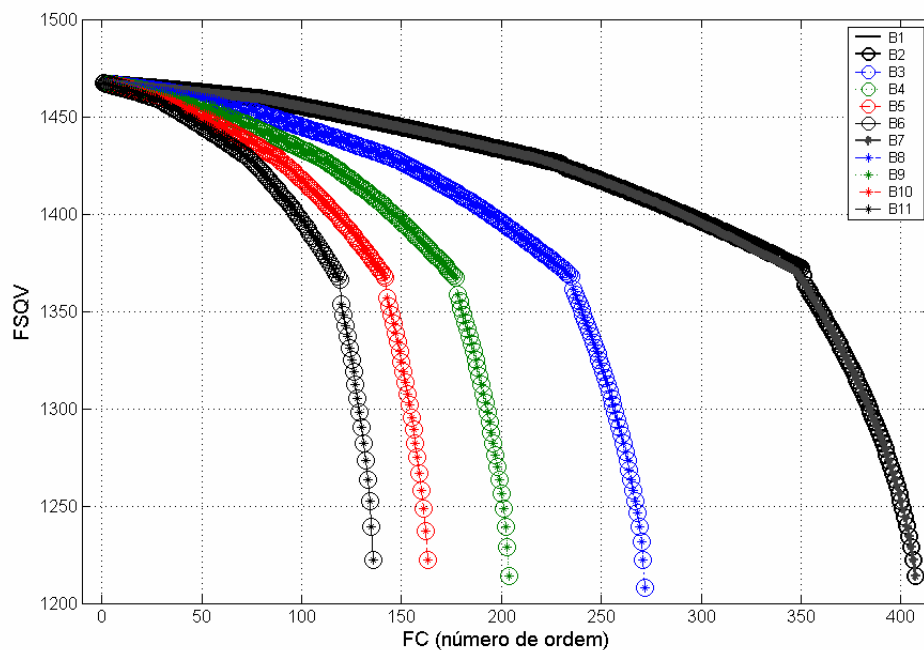


Figura 5.18 – Curvas FSQV referentes aos cenários A1 a A11 (rede de simulação de 57 barramentos)

Como se pode ver na figura 5.18, aparentemente as 11 curvas são parecidas, nos seus andamentos. O andamento das curvas, do início até ao ponto de quebra, não é igual. Até parece que houve uma compressão, no eixo das abcissas, deste primeiro troço das quatro primeiras curvas, com um factor de escala diferente. Do ponto de quebra até ao colapso existe também uma ligeira compressão no mesmo eixo, mas em menor escala. No eixo das ordenadas não existe nenhum factor de escala, pois os valores iniciais são iguais e os valores finais são praticamente iguais. Existe então uma forte suspeita de existir um factor de escala que relaciona as várias curvas referentes aos vários grupos que foram anteriormente definidos.

A tabela 5.14 apresenta as características dos vários grupos de curvas, assim como, também, factores que as relacionam e número de pontos a eliminar de várias curvas para que possam ter o mesmo número de pontos.

Tabela 5.14 – Características das curvas referentes aos cenários B1 a B11 (rede de simulação de 57 barramentos)

Cenário de carga	Número de FC	Factor de relação com B1	Factor de relação com B6/B11	Pontos a eliminar
B1	407	-	3	2 em 3
B2	407	1,0	3	2 em 3
B3	272	1,5	2	1 em 2
B4	204	2,0	1,5	1 em 3
B5	163	2,5	1,2	1 em 6
B6	136	3,0	-	Não alterado
B7	407	1,0	3	2 em 3
B8	272	1,5	2	1 em 2
B9	204	2,0	1,5	1 em 3
B10	163	2,5	1,2	1 em 6
B11	136	3,0	-	Não alterado

A existência de factores que relacionam os vários grupos de curvas possibilita a conversão das várias curvas, com maior número de FC, para o menor valor de FC, por eliminação de pontos. Como as curvas do 5º grupo, B6/B11, têm o menor número de FC, 136, todas as outras curvas terão que ser convertidas para 136 pontos, para ser possível compará-las. Como exemplo do processo de eliminação, analisa-se como foi realizada a conversão da curva B1 para 136 pontos. Como a relação com as curvas B6/B11 é 3, ver tabela 5.14, eliminam-se os 2º e 3º, 5º e 6º, pontos da curva.

Na figura 5.19 apresentam-se as curvas FSQV convertidas para o menor número de pontos, 136 pontos, referente aos cenários B1 a B11.

A análise da figura 5.19 leva a concluir, que se confirma a suspeita de que as 11 curvas FSQV são praticamente iguais, ou seja, surpreendentemente, as referidas curvas convertidas são praticamente coincidentes.

A constatação deste facto leva a reflectir sobre novas metodologias de abordagem ao problema.

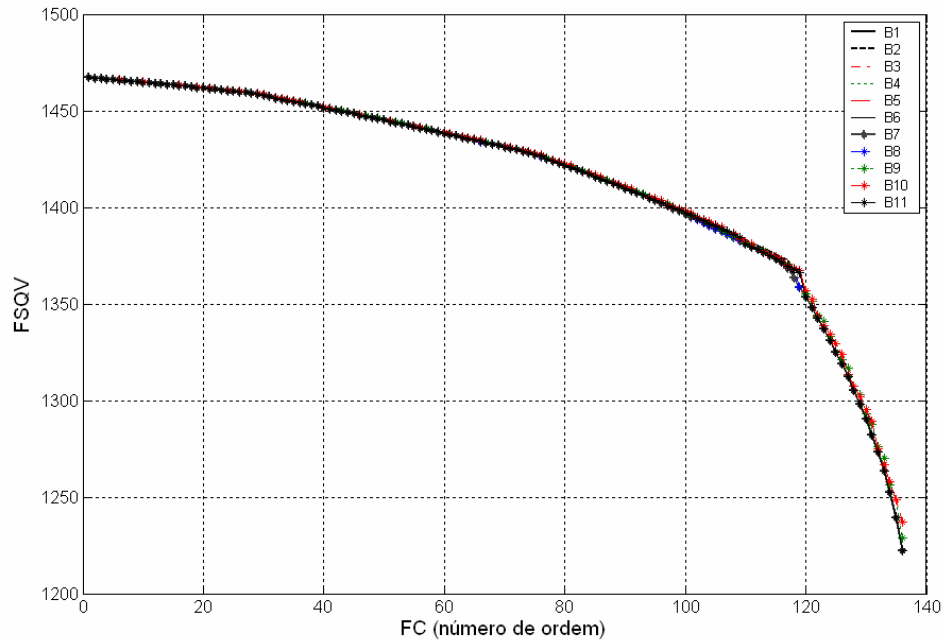


Figura 5.19 – Curvas FSQV dos cenários B1 a B11 convertidas para o menor número de pontos (136)

5.4.3 – Uma segunda abordagem da detecção do ponto de colapso com o método FSQV e com vários cenários de carga

Na primeira abordagem, a análise de resultados, das várias simulações com os cenários A1 a A9, para a rede de testes de 14 barramentos, e B1 a B11, para a rede de testes com 57 barramentos, levou à conclusão que o aumento do factor α , para os barramentos excepção, provocava uma redução de número de FC necessários para atingir o colapso de tensão da rede. Por outro lado, também se concluiu que eram os barramentos excepção, que por terem os factores α mais altos, determinavam o PMC da rede de testes.

Partindo das conclusões referidas acima formula-se, criando uma segunda abordagem, a seguinte tese: o que é que acontece se se utilizar uma metodologia inversa à usada até agora, mas que tenha o mesmo efeito. Na primeira abordagem era a partir de um α base de valor 0,001, que eram definidos os outros α para os barramentos excepção, (ver secção 5.4.2). Os factores α dos barramentos excepção eram então calculados, por multiplicação do primeiro α por um factor de multiplicação, que poderia ser 1,5 ou 2 caso se quisesse mais 50 % ou 100%. Nesta segunda abordagem, vai-se manter constante o valor do factor α dos barramentos excepção e sempre igual a 0,001, já que é o factor de crescimento mais

alto, que define o número de FC necessários para ser atingido o ponto de colapso. O factor α base será calculado pela multiplicação do factor α dos barramentos excepção, de um factor (inferior a um) que faça, na mesma, reflectir o aumento de cargas dos barramentos excepção. Procura-se assim que o número de FC necessários para atingir o colapso se mantenha constante, independentemente dos cenários escolhidos, e seja, desta forma, possível comparar as curvas sem ser necessário recorrer à sua conversão.

5.4.3.1 – Curvas FSQV com vários cenários de carga definidos para a rede de testes de 14 barramentos (2ª abordagem)

Aplicando a nova metodologia serão definidos os novos factores de crescimento α dos cenários de cargas A1 a A9 referentes à rede de simulação de 14 barramentos.

Na tabela 5.15 apresentam-se os referidos cenários, em que o cálculo dos valores dos factores α já reflecte a aplicação desta nova metodologia que suporta esta 2ª abordagem.

Na tabela 5.16 apresentam-se os resultados, últimos 4 valores do FSQV, e outros dados referentes às simulações com a rede de 14 barramentos e para os cenários definidos na tabela 5.15.

A análise dos resultados da tabela 5.16 leva à confirmação da tese formulada, ou seja, foi possível com a alteração do método de cálculo dos factores de crescimento α obter as curvas, com praticamente o mesmo numero de pontos. Comparando com os resultados da primeira abordagem, é possível concluir que:

- os erros nos cenários A5 e A8 cresceram, sendo a subida maior a referente ao cenário A5, ou seja, o erro passou de 1,34 % para -3,06 %;
- os erros nos restantes 6 cenários diminuíram;
- houve uma ligeira diminuição do número de FC para atingir o colapso, verificando-se no cenário A9 a maior discrepância, menos 4 FC.

Os resultados obtidos, com a rede de testes de 14 barramentos, são promissores mas ainda não conclusivos, dado que as curvas não têm exactamente o mesmo número de pontos.

Mas será que a dimensão da rede tem influência nos resultados? A esta questão será possível responder na próxima secção onde serão efectuadas as simulações com a rede de 57 barramentos e que certamente clarificarão esta situação.

Tabela 5.15 – Cenários de cargas A1 a A9 para a rede de 14 barramentos (2º abordagem)

Cenário de carga	α base	Exceções		
		Barramentos	α	Observações
A1	0,001	-	-	-
A2	0,001	2 e 3	0	Carga constante
A3	0,0008	2 e 3	0,001	Mais 25 % de carga
A4	0,000667	2 e 3	0,001	Mais 50 % de carga
A5	0,0005	2 e 3	0,001	Mais 100 % de carga
A6	0,001	12 e 14	0	Carga constante
A7	0,0008	12 e 14	0,001	Mais 25 % de carga
A8	0,000667	12 e 14	0,001	Mais 50 % de carga
A9	0,0005	12 e 14	0,001	Mais 100 % de carga

Tabela 5.16 – Quatro últimos valores FSQV para os cenários A1 a A9 para a rede de 14 barramentos (2º abordagem)

Cenário de carga	Último FC-3	Último FC-2	Último FC-1	Último FC	Erro (a) (%)	Número FC (b)	PMC (%) (c)
A1	196,83	196,05	195,13	193,36	-	761	76
A2	198,09	197,54	196,71	195,92	1,32	759	75,9
A3	196,75	195,87	194,90	193,42	0,03	761	76,1
A4	197,43	196,75	195,87	194,90	0,80	760	76
A5	198,14	197,42	196,72	187,45	-3,06	759	75,9
A6	196,79	195,88	194,95	193,51	0,08	761	76,1
A7	196,71	195,90	195,13	193,75	0,20	761	76,1
A8	198,07	197,47	196,71	195,89	1,31	759	75,9
A9	199,23	198,77	198,06	197,42	2,10	757	75,7
(a) - Erro calculado com os valores FSQV referentes ao último FC em relação ao cenário A1 (b) – Número de FC necessários para atingir o colapso (c) – PMC tendo por referência a carga base desta rede							

5.4.3.2 – Curvas FSQV com vários cenários de carga definidos para a rede de testes de 57 barramentos (2ª abordagem)

Com a aplicação da nova metodologia de cálculo serão definidos os novos factores α referentes aos cenários de cargas B1 a B11 da rede de 57 barramentos.

Na tabela 5.17 apresentam-se os referidos cenários, em que o cálculo dos valores dos factores α já reflecte a aplicação desta nova metodologia.

Tabela 5.17 – Cenários de cargas B1 a B11 para a rede de 57 barramentos (2º abordagem)

Cenário de carga	α Base	Excepções		
		Barramentos	α	Obs.
B1	0,001	-	-	-
B2	0,001	2 e 3 (a)	0	Carga constante
B3	0,000667	2 e 3 (a)	0,001	Mais 50 %
B4	0,0005	2 e 3 (a)	0,001	Mais 100 %
B5	0,0004	2 e 3 (a)	0,001	Mais 150 %
B6	0,000333	2 e 3 (a)	0,001	Mais 200 %
B7	0,001	19, 20, 30, 31, 42 e 57 (b)	0	Carga constante
B8	0,000667	19, 20, 30, 31, 42 e 57 (b)	0,001	Mais 50 %
B9	0,0005	19, 20, 30, 31, 42 e 57 (b)	0,001	Mais 100 %
B10	0,0004	19, 20, 30, 31, 42 e 57 (b)	0,001	Mais 150 %
B11	0,000333	19, 20, 30, 31, 42 e 57 (b)	0,001	Mais 200 %
(a) – Barramentos com cargas reactivas mais elevadas (b) - Barramentos críticos (ver tabela 5.6)				

Na tabela 5.18 apresentam-se os resultados, últimos 4 valores do FSQV, e outros dados importantes, referentes às simulações com a rede de 57 barramentos e com os cenários definidos na tabela 5.17.

A análise dos resultados apresentados na tabela 5.18 permite concluir:

- todos os valores FSQV do último FC são iguais e por isso o erro é zero na comparação dos cenários B2 a B11 com o cenário B1;
- os restantes valores, no máximo têm a diferença de uma décima o que torna desprezável o erro;

Tabela 5.18 – Quatro últimos FSQV para os cenários B1 a B11 para a rede de 57 barramentos (2º abordagem)

Cenário de carga	FC Nº 404	FC Nº 405	FC Nº 406	FC Nº 407	Erro (a) (%)	Número FC (b)	PMC (%) (c)
B1	1234,50	1228,90	1222,30	1213,80		407	40,6
B2	1234,50	1228,80	1222,20	1213,80	0,00	407	40,6
B3	1234,50	1228,80	1222,30	1213,80	0,00	407	40,6
B4	1234,50	1228,80	1222,30	1213,80	0,00	407	40,6
B5	1234,50	1228,80	1222,30	1213,80	0,00	407	40,6
B6	1234,50	1228,80	1222,30	1213,80	0,00	407	40,6
B7	1234,50	1228,80	1222,20	1213,80	0,00	407	40,6
B8	1234,50	1228,80	1222,30	1213,80	0,00	407	40,6
B9	1234,50	1228,80	1222,30	1213,80	0,00	407	40,6
B10	1234,50	1228,90	1222,20	1213,80	0,00	407	40,6
B11	1234,50	1228,80	1222,30	1213,80	0,00	407	40,6
(a) - Erro calculado com os valores FSQV referentes ao último FC em relação ao cenário A1 (b) – Número de FC necessários para atingir o colapso (c) – PMC referido à carga base							

- todas as simulações têm o mesmo número de FC o que torna a comparação das curvas completamente possível;
- a confirmação de uma tendência, que anteriormente já tinha sido referida, de os resultados com a rede de testes de 57 barramentos serem sempre melhores, face aos obtidos com a rede de 14 barramentos.

Os resultados destas onze simulações confirmam a possibilidade da utilização da grandeza FSQV na detecção do ponto de colapso de tensão nas redes de teste utilizadas, especialmente para a rede de 57 barramentos. Este novo método demonstra ter uma enorme robustez, já que o último valor da grandeza FSQV se mantém constante, mesmo utilizando um factor α triplo para as cargas dos barramentos mais pesados, em termos de carga, ou os críticos.

Estes resultados confirmam que com o aumento da dimensão da rede de testes o método FSQV torna-se mais estável, já que os resultados das simulações com a rede de testes de 14 barramentos eram promissores mas não eram tão concludentes como os obtidos com a rede de testes de 57 barramentos.

As onze curvas têm agora o mesmo número de pontos o que permite, sem qualquer tratamento de dados, compará-las. Na figura 5.20 estão representadas as curvas FSQV, referentes aos cenários B1 a B11 para a rede de simulação de 57 barramentos.

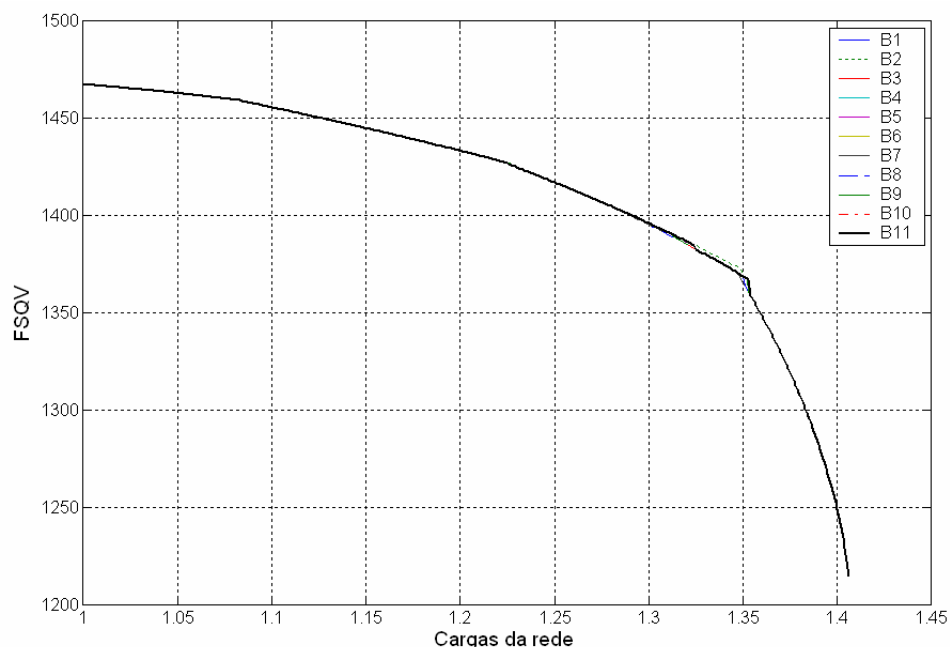


Figura 5.20 – Curvas FSQV referente aos cenários B1 a B11 para a rede de simulação de 57 barramentos (2ª abordagem)

A sobreposição das 11 curvas FSQV, obtidas pela aplicação da 2ª abordagem, e representadas na figura 5.20, é muito maior, em comparação com as 11 curvas FSQV convertidas e representadas na figura 5.19. Mesmo assim, há uma zona das curvas FSQV, ver figura 5.20, de menor sobreposição que se localiza antes e depois do ponto de quebra.

As onze curvas ao terem o mesmo número de pontos permitem também o cálculo do erro, ponto a ponto, em relação à curva base. Nas figuras 5.21 e 5.22 são apresentados os valores dos erros de comparação das curvas FSQV, ponto a ponto, do cenário B1 com os cenários B2 a B11 para a rede de 57 barramentos.

Como se pode ver nas figuras 5.21 e 5.22, a distribuição dos erros ao longo das curvas não é igual. Há uma concentração dos maiores erros numa única zona, que se localiza entre o FC 280 e 355. Para tentar melhorar a análise desta zona, as figuras 5.23 e 5.24 apresentam as mesmas curvas de erros, apresentadas nas figuras 5.21 e 5.22, mas agora só visualizando a zona de maiores erros, ou seja, entre os FC 280 e 355.

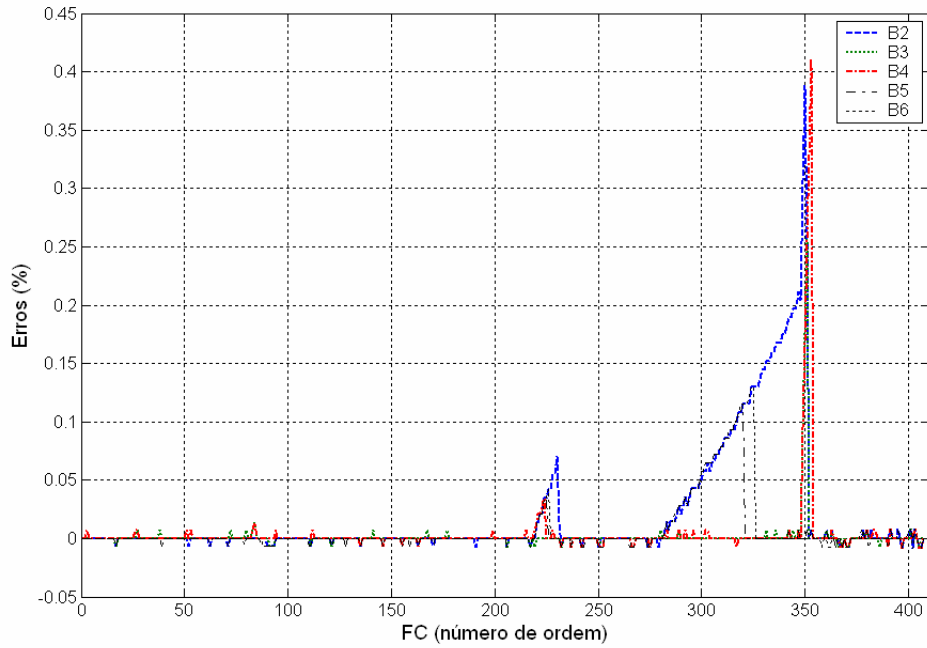


Figura 5.21 – Erros de comparação da curva FSQV do cenário B1 com as curvas FSQV dos cenários B2 a B6 para a rede de 57 barramentos (2ª abordagem)

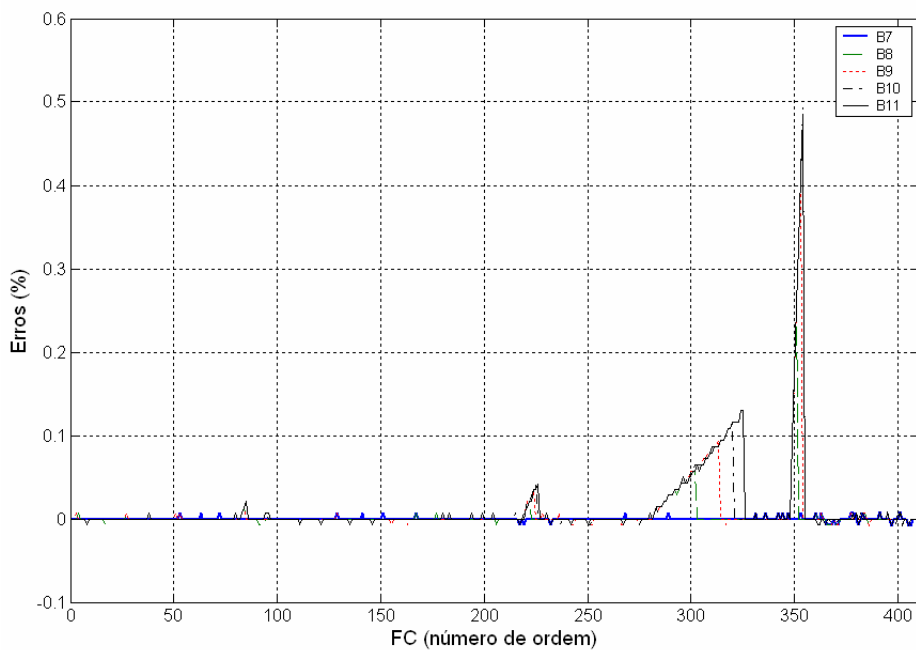


Figura 5.22 – Erros de comparação da curva FSQV do cenário B1 com as curvas FSQV dos cenários B7 a B11 para a rede de 57 barramentos (2ª abordagem)

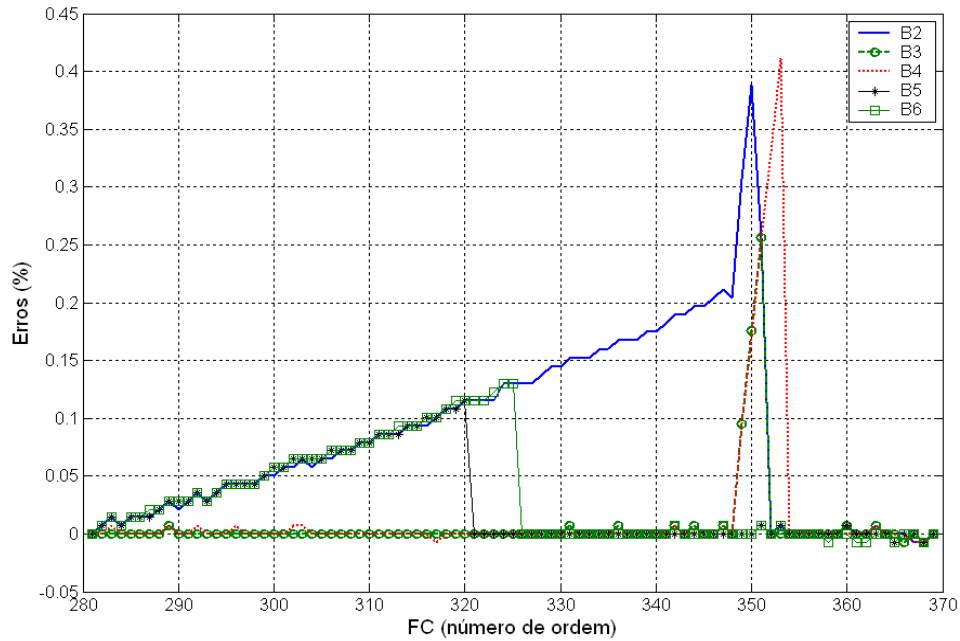


Figura 5.23 – Erros de comparação da curva FSQV do cenário B1 com as curvas FSQV dos cenários B2 a B6 (2ª abordagem) para a rede de 57 barramentos entre os FC 280 e 355

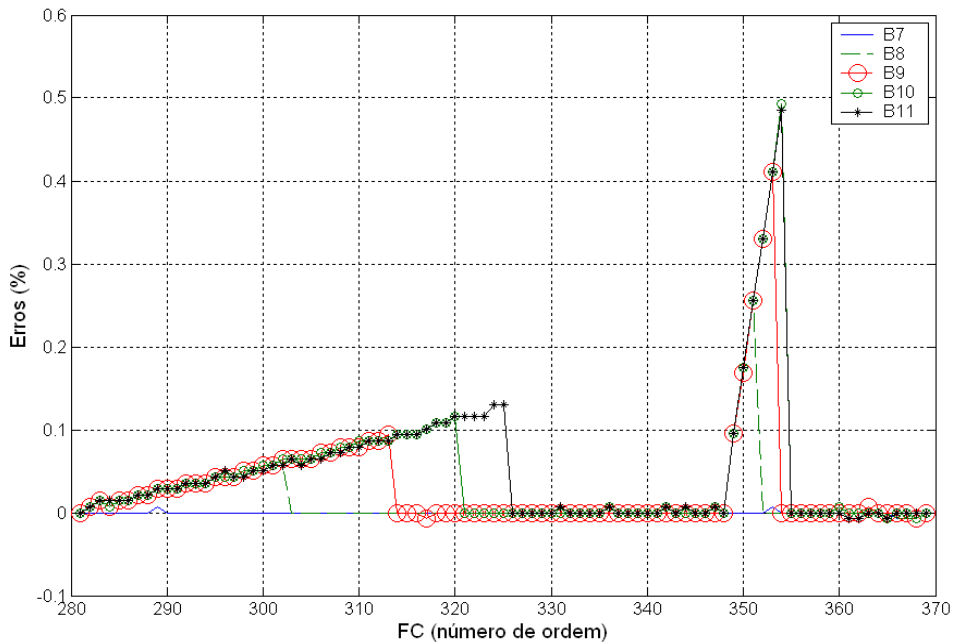


Figura 5.24 – Erros de comparação da curva FSQV do cenário B1 com as curvas FSQV dos cenários B7 a B11 (2ª abordagem) para a rede de 57 barramentos entre os FC 280 e 355

Como se pode ver na figura 5.22, o maior erro percentual (0,493 %) ocorre no FC 354 na simulação do cenário 10. No mesmo FC, ocorre o segundo maior erro percentual (0,485 %) na simulação do cenário 11.

Para perceber o que provoca estes erros, neste local do FC contínuo, uma possível abordagem é a análise dos limites de produção dos vários geradores que se encontram ligados a barramentos PV da rede de testes, assim como, também, os crescimentos de cargas que acontecem nos vários cenários.

Na tabela 5.19 são apresentados a localização, no FC contínuo, dos limites de produção de energia reactiva para as simulações com os cenários B1 a B11 de carga e para a rede de simulação de 57 barramentos.

Na tabela 5.20 são apresentados os crescimentos de cargas, geral e barramentos excepção, e a potência reactiva total das cargas no FC antes do colapso para as simulações com os cenários B1 a B11 de carga e para a rede de 57 barramentos (1ª e 2ª abordagem). As cargas finais nos barramentos, referentes aos 11 cenários, são apresentadas nas tabelas C4 e C5 do Anexo C respectivamente para a 1ª e 2ª abordagem.

Tabela 5.19 – Limites de produção de energia reactiva e tensões no momento do colapso nos barramentos PV e críticos para a rede de 57 barramentos e para os cenários B1 a B11

Cenário	Produção de energia reactiva					
	2 Bus (0,5 pu)	3 Bus (0,6 pu)	6 Bus (0,25pu)	8 Bus (2 pu)	9 Bus (0,09 pu)	12 Bus (1,55 pu)
1	281	219	229	349	47	83
2	0,143 pu (a)	0,515 pu (a)	232	352	47	83
3	281	219	0,247 pu (a)	1,970 pu (a)	0,055 pu (a)	1,518 pu (a)
4	281	219	0,246 pu (a)	1,955 pu (a)	0,037 pu (a)	1,501pu (a)
5	281	219	0,245 pu (a)	1,946 pu (a)	0,027 pu (a)	1,491pu (a)
6	281	219	0,245 pu (a)	1,940 pu (a)	0,020 pu (a)	1,485 pu (a)
7	281	219	229	349	48	83
8	0,381 pu (a)	0,572 pu (a)	0,247 pu (a)	1,970 pu (a)	0,055 pu (a)	1,518 pu (a)
9	0,321 pu (a)	0,557 pu (a)	0,246 pu (a)	1,955 pu (a)	0,037 pu (a)	1,501 pu (a)
10	0,286 pu (a)	0,549 pu (a)	0,245 pu (a)	1,946 pu (a)	0,027 pu (a)	1,492 pu (a)
11	0,262 pu (a)	0,543 pu (a)	0,245 pu (a)	1,940 pu (a)	0,020 pu (a)	1,485 pu (a)
(a) - Como não atinge o limite de produção, é o valor de produção de energia reactiva no último FC antes do colapso						
(b) - Potência de base de 100 MVA						

Tabela 5.20 – Crescimentos de cargas das duas abordagens para a rede de 57 barramentos

Cenário	1ª Abordagem			2ª Abordagem		
	Crescimento Base (%)	Crescimento Barramentos Excepção	Potência Reactiva (a)	Crescimento Base	Crescimento Barramentos Excepção	Potência Reactiva (a)
1	40,6	40,6	4,730	40,6	40,6	4,730
2	40,6	40,6	4,287	40,6	40,6	4,287
3	27,1	40,65	4,423	27,1	40,6	4,423
4	20,3	40,6	4,268	20,3	40,6	4,268
5	16,2	40,5	4,174	16,2	40,6	4,175
6	13,5	40,5	4,112	13,5	40,6	4,114
7	40,6	40,6	4,678	40,6	40,6	4,678
8	27,1	40,65	4,293	27,1	40,6	4,293
9	20,3	40,6	4,073	20,3	40,6	4,073
10	16,2	40,5	3,940	16,2	40,6	3,940
11	13,5	40,5	3,852	13,5	40,6	3,853
(a) - Potência reactiva total das cargas no FC anterior ao colapso em pu. Potência de base de 100 MVA						

Analisando as tabelas 5.19 e 5.20 verifica-se que:

- no cenário 2, cargas constantes nos barramentos 2 e 3, ver tabela 5.17, os geradores localizados nos seus barramentos não atingem o limite de produção de energia reactiva. A diferença entre as potências reactivas totais das cargas do cenário 1 e 2 (0,443 pu) é igual à diferença entre as produções e os limites de produção;
- com as cargas a crescer mais nos barramentos 2 e 3, cenários B3,..., B6, ver tabela 5.16, só os geradores localizados nos seus barramentos é que atingem o limite de produção de energia reactiva. Nestas quatro situações a diferença entre os valores produzidos e os respectivos limites de produção de energia reactiva, é muito inferior à diferença entre as potências reactivas totais das cargas do cenário 1 e cenários 3,...,4. Uma explicação possível para esta desigualdade é a necessidade de ser necessário transportar através da rede a energia reactiva até aos barramentos 2 e 3, após os geradores que se localizam nos seus barramentos atingirem o seus limites de produção de energia reactiva e serem as cargas que crescem mais;

- com as cargas a não crescerem nos barramentos críticos, ver tabela 5.16, cenário B7, os geradores atingem todos os limites de produção exactamente no mesmo FC do cenário 1 com excepção do gerador do barramento 9 que atinge um FC depois. A má qualidade da figura 5.2 não permite relacionar este facto com a localização dos barramentos críticos. A diferença entre as potências reactivas totais das cargas entre o cenário 7 e 1 (0,05 pu) é igual à diferença das cargas finais destes barramentos críticos;
- com as cargas a crescer mais nos barramentos críticos, cenários B8,..., B11, ver tabela 5.16, nenhum gerador atinge o limite de produção de energia reactiva. Como as restantes cargas da rede crescem menos, e sendo a maioria, naturalmente que a necessidade de energia reactiva é menor. As potências reactivas totais destes quatro cenários espelham exactamente esta situação. Os dois balanços energéticos dão valores diferentes, ou seja, a diferença entre as potências reactivas totais das cargas do cenário 1 e cenários 8,...,11, é superior à diferença entre os valores produzidos e os respectivos limites de produção de energia reactiva.

Na tabela 19 também se pode verificar que:

- o crescimento base, independentemente do método utilizado, é igual em todos os cenários;
- o crescimento nos barramentos excepção tem uma ligeira diferença que se pode considerar desprezável;
- todos os cenários têm potências reactivas totais diferentes no FC antes do colapso, o que significa que, perante estes resultados destas simulações da rede de 57 barramentos, se pode afirmar que o ponto do colapso é independente da potência reactiva das cargas.

A análise realizada para descobrir algum padrão nas várias relações encontradas não justificam os erros das curvas FSQV.

5.4.4 – Limite do aumento de carga base definindo um erro máximo para a grandeza FSQV

Na secção anterior foi possível provar, após a análise dos resultados das simulações efectuadas, e para os cenários de carga definidos para a rede de testes de 57 barramentos, que o valor FSQV final não se alterava, podendo por isso, ser utilizado como um novo método de detecção do ponto do colapso de tensão. No entanto, a metodologia que foi usada baseou-se sempre no mesmo ponto de partida em relação às cargas, ou seja, o ponto de partida foi sempre as cargas base das redes de teste.

Na perspectiva de encontrar os limites deste novo método coloca-se uma nova questão. Será que ainda é válido este novo método de detecção do colapso de detecção, caso a carga de partida de um barramento se alterar? É esta a motivação para iniciar um novo ciclo, abrindo uma nova direcção para a investigação científica e para o conhecimento deste novo método.

5.4.4.1 – Limite do aumento de carga base para um barramento definindo um erro máximo para a grandeza FSQV

O primeiro conjunto de simulações que se efectuará consistirá na realização de 50 colapsos, com aumentos da carga base do barramento 2, da rede de 57 barramentos, em 5%, em cada simulação e a partir do segundo colapso. Com o valor final da grandeza FSQV, de cada simulação, calcular-se-á o desvio percentual em relação ao valor calculado na 1ª simulação e que se referirá à carga base.

Na tabela 5.21 apresentam-se os principais resultados, erros dos valores FSQV, para os aumentos de carga do referido barramento 2. Na tabela C6 são apresentados os resultados, na sua totalidade, e referentes à mesma simulação.

Tabela 5.21 – Principais erros dos valores FSQV finais para os aumentos de carga do barramento 2 da rede de 57 barramentos

Crescimento da carga (%)	Número De FC (1)	PMC (%) (2)	FSQV		Erro (%) (3)	Carga (pu)	
			inicial	final		Activa (4)	Reactiva (4)
0	407	40,6	1467,1	1213,8		0,030	0,880
15	405	40,4	1467,1	1211,6	-0,18	0,035	1,012
20	405	40,4	1467,1	1199,6	-1,18	0,036	1,056
185	380	37,9	1467,1	1199,5	-1,19	0,086	2,508
190	380	37,9	1467,1	1189,0	-2,08	0,087	2,552
250	370	36,9	1467,1	1193,1	-1,74	0,105	3,080

(1) – Para atingir o colapso; (2) – Em relação às cargas base da rede de simulação; (3) – Em relação ao valor FSQV final com a carga base (1213,8); (4) – Potência de base de 100 MVA.

Na figura 5.25 são apresentados os erros dos valores FSQV finais, para aumentos de carga base do barramento 2, da rede de 57 barramentos.

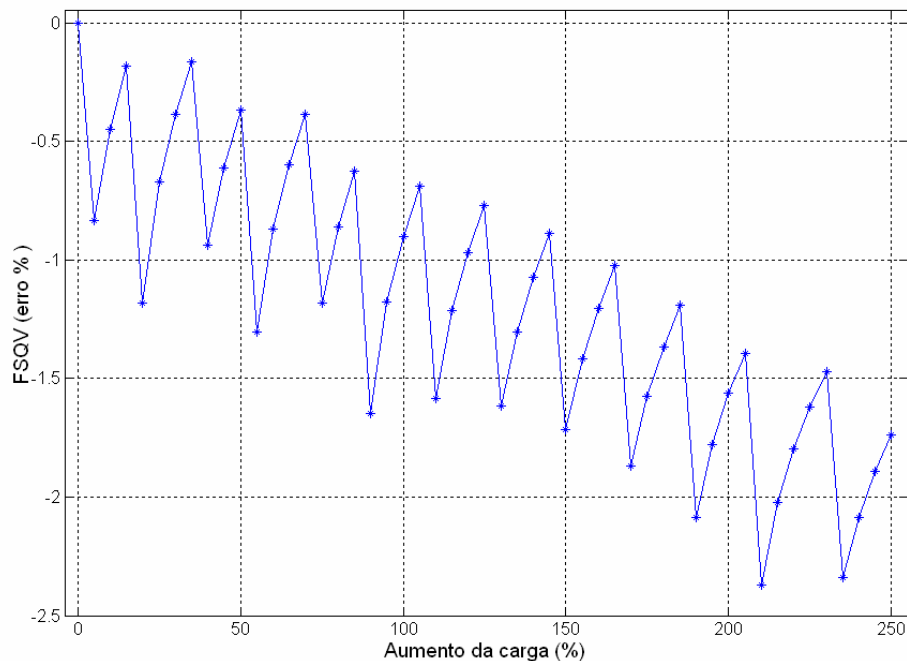


Figura 5.25 – Erros dos valores FSQV finais para aumentos da carga base do barramento 2 da rede de 57 barramentos

Analisando as tabelas 5.21 e C6, do Anexo C, e a figura 5.25 pode-se concluir que:

- os erros de comparação dos valores FSQV finais com o valor FSQV base têm um andamento decrescente e oscilante;
- o erro de -1,18 % do valor FSQV final é obtido com um aumento de carga de 20 %, mas o erro de -2,08 % do valor FSQV final é obtido com um aumento de carga de 190 %, o que é indiciador da não existência de uma relação linear entre os aumentos de carga e o erro.

Das conclusões da análise aos resultados, da simulação do aumento de carga base do barramento 2, da rede de testes de 57 barramentos, verificam-se que é possível aumentar a dimensão do novo método FSQV, de detecção do ponto de colapso de tensão.

Para confirmar a tendência dos resultados obtidos para o barramento 2, efectuou-se um segundo conjunto de simulações, agora para o barramento 3, utilizando a mesma metodologia. A única alteração introduzida foi a redução do incremento dos aumentos de carga de 5 para 1%. Esta alteração obrigou a realizar novamente a simulação dos aumentos de carga do barramento 2 com o novo valor do incremento dos aumentos de carga de 1%.

Tabela 5.22 – Principais erros dos valores FSQV finais para os aumentos de carga do barramento 2 e 3 da rede de 57 barramentos (incrementos de 1%)

Número Barra- Mento	Crescimento Da Carga (%)	Número De FC (1)	PMC (%) (2)	FSQV		Erro (%) (3)	Carga (pu)	
				Inicial	Final		Activa (4)	Reactiva (4)
2	0	407	40,6	1467,1	1213,8		0,030	0,880
2	5	407	40,6	1467,1	1203,8	-0,83	0,032	0,924
2	6	407	40,6	1467,1	1198,8	-1,25	0,032	0,933
2	150	386	38,5	1467,1	1193,3	-1,72	0,075	2,200
2	151	386	38,5	1467,1	1189,5	-2,04	0,075	2,209
3	0	407	40,6	1467,1	1213,8		0,410	0,210
3	16	403	40,2	1467,1	1204,9	-0,74	0,476	0,244
3	17	403	40,2	1467,1	1196,3	-1,46	0,480	0,246
3	92	381	38,0	1467,2	1196,4	-1,45	0,787	0,403
3	93	381	38,0	1467,2	1187,7	-2,20	0,791	0,405
(1) – Para atingir o colapso (2) – Em relação às cargas base da rede de simulação (3) – Em relação ao valor FSQV final com a carga base (1213,8) (4) – Potência de base de 100 MVA								

Na tabela 5.22 são apresentados os principais resultados dos aumentos de carga máximos para o barramento 2 e 3, para os erros dos valores FSQV finais de 1% e 2%, da rede de 57 barramentos. Nas tabelas C7 e C8, são apresentados os resultados, na sua totalidade, das simulações referentes aos mesmos barramentos.

Na figura 5.26 apresentam-se os erros dos valores FSQV finais para aumentos de carga dos barramentos 2 e 3 da rede de simulação de 57 barramentos e referentes aos aumentos de carga de 1 %.

Analisando as tabelas 5.22, C7 e C8 e a figura 5.26 pode-se concluir que:

- a redução do incremento de carga de 5% para 1% aumentou a capacidade de análise de erros;
- para o barramento 2 foi encontrado um valor mais baixo para o desvio do valor FSQV final que ultrapassou pela primeira vez o erro de 1 %, agora com o incremento de cargas de 1% da carga base. No primeiro conjunto de simulações (incrementos de 5 %), o erro de 1% foi pela primeira vez ultrapassado para um aumento de carga de 20%, o que levava a supor que o valor exacto estava entre os aumentos de 15 e 20 %, já que os incrementos de carga eram de 5 % entre FC, ver tabela 5.20. No entanto, como o andamento da curva do erro tem carácter oscilante, havia um valor mais baixo, que não era detectado devido ao incremento ser muito grande;
- com a redução do incremento, detectou-se que com o aumento de carga de 6 %, o erro já ultrapassava 1%, 1,25 % em módulo, estando por isso o erro de 1%, entre o aumento de carga de 5 % e 6%, já que esta zona da curva apresenta um andamento linear;
- de igual forma foi também encontrado um novo valor para o erro de 2%, que agora está entre o aumento de 150 e 151% e anteriormente estava entre o aumento de carga de 185 e 190%, como se pode ver nas tabelas 5.21 e 5.22;
- o andamento das curvas de erros dos barramentos 2 e 3 são semelhantes, sendo os limites do aumento possível entre os 16 a 17 % e 92 a 93 % respectivamente para o erro de 1% e 2% do desvio do FSQV.

Com este 2º conjunto de simulações confirma-se, para o barramento 3 da rede de 57 barramentos, a possibilidade de aumentar a carga base de dois barramentos de um modo individual.

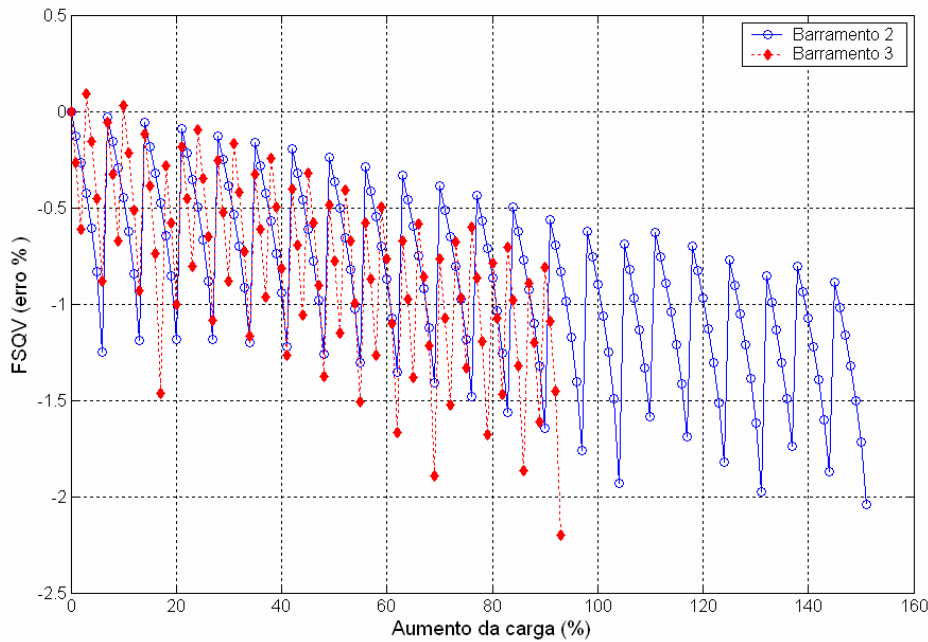


Figura 5.26 – Erros dos valores FSQV finais para aumentos da carga base do barramento 2 e 3 da rede de 57 barramentos (incrementos de 1%)

A questão agora é perceber se estudamos casos particulares, ou se, pelo contrário, já são exemplos de uma tendência geral do comportamento do crescimento de carga de todos os barramentos da rede de testes. Será que os erros, para aumentos de carga dos restantes barramentos, desta rede de testes, têm o mesmo andamento? Interessa, por isso, em seguida, generalizar a análise a todos os barramentos da rede de 57 barramentos.

Para generalizar este estudo efectuaram-se dois conjuntos de simulações, ambas com um incremento da carga base de 1%, tendo o primeiro conjunto o critério de paragem de 1% e o segundo de 2% para o desvio do valor FSQV final. Naturalmente que os conjuntos anteriormente referidos são agora subconjuntos, deste grande conjunto, pois referiam-se unicamente ao conjunto de simulações de um único barramento.

Na tabela 5.23 apresentam-se os resultados, considerados mais importantes, da simulação do aumento de cargas base para todos os barramentos da rede de simulação de 57 barramentos, para o erro máximo de 1% do valor final FSQV, com incrementos da carga base de 1%. Os resultados, na sua totalidade, são apresentados na tabela C9.

Tabela 5.23 – Aumento das cargas base para um erro máximo de 1% no valor final do FSQV para a rede de simulação de 57 barramentos (incrementos de 1%)

Número Barram.	PMC (%) (1)	Tempo (min) (2)	FSQV			Cargas				
			Inicial Valor	Final		Inicial (base)		Final		Aumento (%)
				Valor	Erro (3)	Pot. Act. (pu)	Pot. React. (pu)	Pot.Act. (pu)	Pot.React. (pu)	
2 (4)	40,6	6,01	1467,1	1203,8	-0,83	0,030	0,880	0,032	0,924	5
9 (4)	39,5	8,49	1467,0	1206,4	-0,61	1,210	0,260	1,307	0,281	8
12 (4)	39,1	6,70	1467,0	1202,2	-0,97	3,770	0,240	3,959	0,252	5
27 (5)	40,3	23,83	1466,7	1205,4	-0,70	0,093	0,005	0,116	0,006	25
43 (5)	40,6	22,24	1467,0	1201,9	-0,99	0,020	0,010	0,025	0,012	24
30 (6)	40,6	3,42	1467,0	1207,9	-0,49	0,036	0,018	0,037	0,018	2
38 (6)	40,6	5,13	1466,9	1206,8	-0,58	0,140	0,070	0,143	0,071	2
33 (7)	39,9	22,81	1466,0	1218,1	0,35	0,038	0,019	0,048	0,024	25
35 (7)	37,8	116,47	1460,3	1217,1	0,27	0,060	0,030	0,143	0,071	138
19 (8)	40,6	15,44	1467,0	1202,8	-0,92	0,033	0,006	0,038	0,007	16
20 (8)	40,6	16,22	1466,9	1202,6	-0,93	0,023	0,010	0,027	0,012	17
31 (8)	39,9	11,83	1466,3	1224,5	0,88	0,058	0,029	0,065	0,032	12
57 (8)	40,2	21,30	1466,3	1206,8	-0,58	0,067	0,020	0,082	0,025	23
(1) – Em relação às cargas base da rede de simulação (2) – Tempo gasto nas simulações do barramento (3) – Erro de comparação com o valor FSQV final, 1213,8, calculado com as cargas base (4) – barramentos com cargas reactivas mais altas (5) – barramentos com cargas reactivas mais baixas (6) – barramentos com menores crescimentos de cargas base para o erro máximo definido (7) – barramentos com maiores crescimentos de cargas base para o erro máximo definido (8) – barramentos críticos										

Analisando os resultados apresentados na tabela 5.23 pode-se concluir que todos os barramentos têm crescimentos de carga para o erro final de 1% do FSQV. Além desta importante conclusão é possível ainda concluir que:

- não se encontra uma relação entre o valor das cargas reactivas dos barramentos e o aumento de cargas, ou seja:
 - os barramentos com maiores cargas reactivas, barramentos 2, 9 e 12 (ver tabela A3 do anexo A), não têm os menores crescimento de carga;
 - os barramentos com menores cargas reactivas, barramentos 27 e 43 (ver tabela A3 do anexo A), não têm os maiores crescimento de carga;

- os barramentos com menores crescimento de carga (2%), barramentos 30 e 38, não têm as menores cargas reactivas base (0,018 e 0,070 pu);
- o barramento com maior crescimento (138%), barramento 35, tem uma carga reactiva base de 0,030 pu, que é, superior à carga do barramento 30, mas inferior à carga do barramento 38;
- o barramento 2 mesmo tendo a carga reactiva mais alta, 0,88 pu (ver tabela A3 do anexo A), o PMC desta simulação não se altera, ou seja mantém-se no valor 40,6. A carga reactiva neste barramento aumenta 5%, mais do dobro do aumento mínimo verificado nos barramentos 30 e 38;
- o barramento 35 tem o menor PMC cujo valor é 37,8 e o maior crescimento;
- os barramentos críticos, que entram primeiro em colapso, não têm os menores crescimentos.

As conclusões da análise aos resultados apresentados na tabela 5.23, não são conclusivas, ou seja, não indiciam qualquer relação entre o crescimento de cargas e o valor das cargas reactivas dos barramentos ou outros aspectos analisados.

Na figura 5.27 são apresentados os valores máximos dos aumentos de carga para todos os barramentos, com carga, da rede de 57 barramentos, para os erros dos valores FSQV finais de 1%.

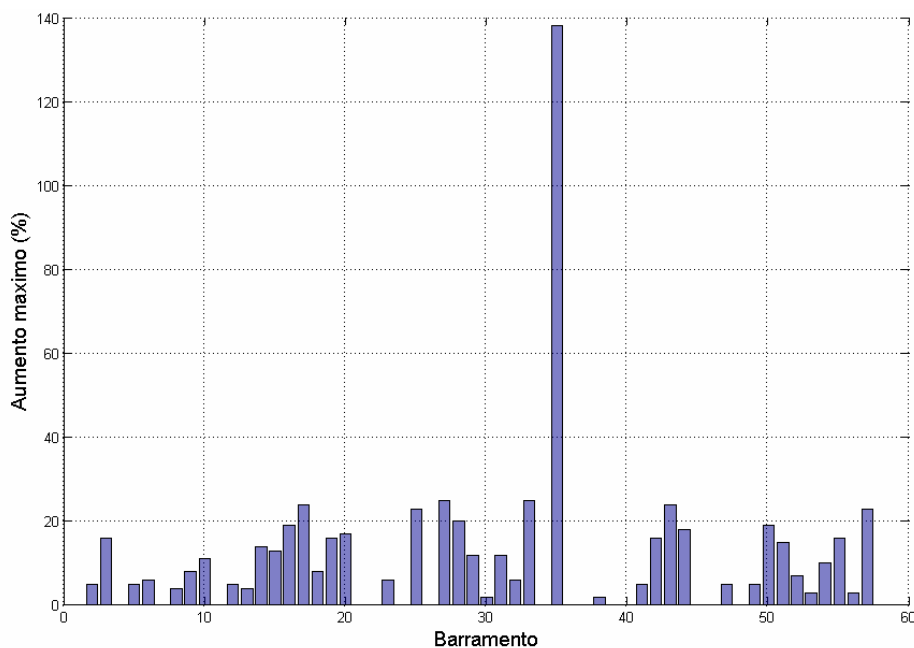


Figura 5.27 – Aumentos máximos de carga base dos barramentos da rede de 57 barramentos para o erro dos valores FSQV finais máximo de 1% e para o incremento de 1%

Na figura 5.28 são apresentados os valores máximos dos aumentos de carga para todos os barramentos, com carga, da rede de 57 barramentos, para os erros dos valores FSQV finais de 2%.

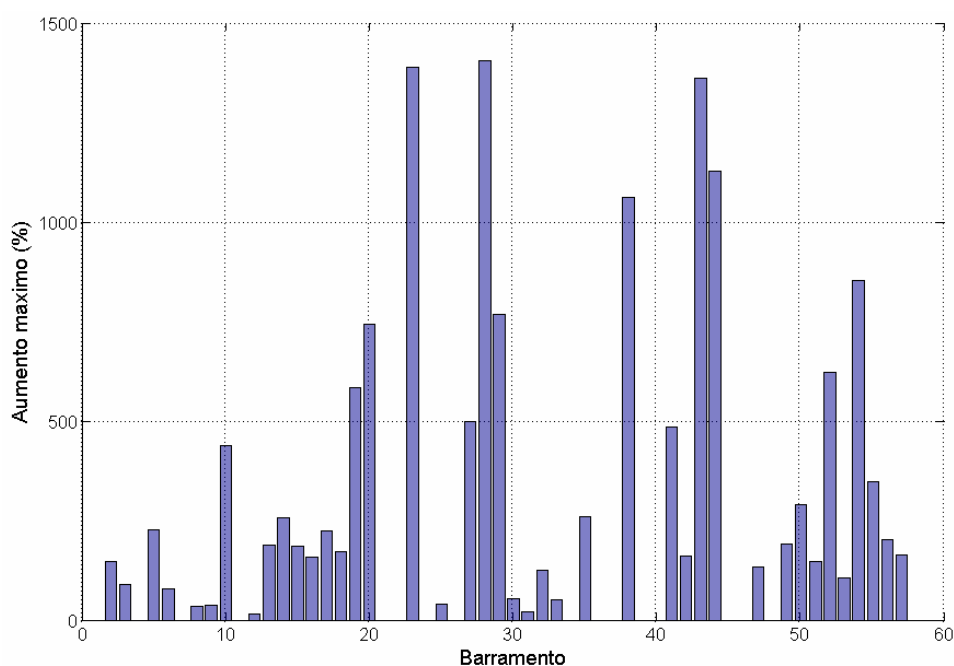


Figura 5.28 – Aumentos máximos de carga base dos barramentos da rede de 57 barramentos para o erro dos valores FSQV finais máximo de 2% e para o incremento de 1%

Na tabela 5.24 são apresentados os resultados, considerados mais importantes, da simulação do aumento de cargas base, para o erro máximo de 2% do valor final FSQV, para a rede de simulação de 57 barramentos, com incrementos de 1%. Os resultados, na sua totalidade, são apresentados na tabela C10.

Na tabela 5.25 é apresentada a comparação dos resultados dos aumentos de carga para um erro de 1% e 2%.

Analisando os resultados apresentados nas tabelas 5.24 e 5.25 pode-se concluir que com o aumento do erro de 1 para 2 %:

- o aumento de carga máximo passou de 138 % (erro de 1%) para 1404 %, obtido no barramento 28. Este barramento, para um erro de 1 %, tinha um aumento de 20 %, o que corresponde a um incremento de 6920 %;
- o aumento de carga mínimo passou de 2% (erro de 1%) para 18 %, obtido no aumento de carga do barramento 12. Este barramento, para um erro de 1 %, tinha um aumento de 5 %, o que corresponde a um incremento de 260 %;

- o maior incremento do aumento de cargas refere-se ao barramento 38, que passou de 2% para 1404 %, o que corresponde a um aumento de 53050 %.

Tabela 5.24 – Aumento das cargas base para um erro máximo de 2% no valor final do FSQV para a rede de simulação de 57 barramentos (incrementos de 1%)

Número Barram.	PMC (%) (1)	Tempo (horas) (2)	FSQV			Cargas				
			Inicial Valor	Final		Inicial (base)		Final		Aumento (%)
				Valor	Erro (3)	Pot. Act. (pu)	Pot. React. (pu)	Pot.Act. (pu)	Pot.React. (pu)	
2 (4)	38,5	2,10	1467,1	1193,3	-1,72	0,030	0,880	0,075	2,200	150
9 (4)	35,1	0,54	1466,9	1196,6	-1,44	1,210	0,260	1,682	0,361	39
12 (4) (6)	35,0	0,28	1466,6	1191,2	-1,90	3,770	0,240	4,449	0,283	18
27 (5)	31,5	6,48	1457,9	1229,0	1,23	0,093	0,005	0,558	0,030	500
43 (5) (7)	35,8	18,14	1462,5	1208,2	-0,47	0,020	0,010	0,292	0,146	1362
31 (6) (8)	39,2	0,35	1465,6	1234,5	1,68	0,058	0,029	0,071	0,036	23
23 (7)	21,4	15,80	1420,2	1226,3	1,01	0,063	0,021	0,939	0,313	1390
28 (7)	25,7	16,85	1451,7	1224,9	0,91	0,046	0,023	0,692	0,346	1404
19 (8)	35,8	8,05	1462,0	1228,4	1,19	0,033	0,006	0,226	0,041	586
20 (8)	35,3	10,08	1458,8	1226,7	1,05	0,023	0,010	0,194	0,084	744
57 (8)	36,3	2,25	1460,6	1230,9	1,39	0,067	0,020	0,179	0,053	167
(1) – Em relação às cargas base da rede de simulação (2) – tempo gasto nas simulações do barramento (3) – erro de comparação com o valor FSQV final, 1213,8, calculado com as cargas base (4) – barramentos com cargas reactivas mais altas (5) – barramentos com cargas reactivas mais baixas (6) – barramentos com menores crescimento de cargas base para o erro máximo definido (7) – barramentos com maiores crescimento de cargas base para o erro máximo definido (8) – barramentos críticos										

Também se pode concluir que não existe a separação entre os grupos definidos anteriormente e apresentados na tabela 5.23, ou seja:

- o barramento 12, terceiro com mais carga reactiva base é agora o barramento que tem menor aumento de cargas, 18 %, e o quarto menor incremento, 260 %. Anteriormente, para o erro de 1%, tinha um aumento de 5 % sendo o mínimo de 2 %;
- o barramento 9, segundo com mais carga reactiva base é agora o quarto barramento que tem menor aumento de cargas, 39 % e o sexto com menor incremento, 388 %. Anteriormente, para o erro de 1%, tinha um aumento de 8 % sendo o mínimo de 2 %;

Tabela 5.25 – Comparação do aumento de cargas base para um erro máximo de 1% e 2% no valor final do FSQV para a rede de 57 barramentos (incrementos de 1%)

Indexado por Num. Bar.				Indexado por Erro 2				Indexado por incremento			
Num. Bar.	Aumento de carga		Incr_mento (%)	Num. Bar.	Aumento de carga		Incr_mento (%)	Num. Bar.	Aumento de carga		Incr_mento (%)
	Erro 1 %	Erro 2 %			Erro 1 %	Erro 2 %			Erro 1 %	Erro 2 %	
2	5	150	2900	12	5	18	260	25	23	43	87
3	16	92	475	31	12	23	92	35	138	261	89
5	5	230	4500	8	4	37	825	31	12	23	92
6	6	82	1267	9	8	39	388	33	25	54	116
8	4	37	825	25	23	43	87	12	5	18	260
9	8	39	388	33	25	54	116	9	8	39	388
10	11	439	3891	30	2	56	2700	3	16	92	475
12	5	18	260	6	6	82	1267	57	23	167	626
13	4	190	4650	3	16	92	475	16	19	161	747
14	14	259	1750	53	3	108	3500	8	4	37	825
15	13	189	1354	32	6	127	2017	17	24	226	842
16	19	161	747	47	5	136	2620	51	15	150	900
17	24	226	842	2	5	150	2900	42	16	163	919
18	8	175	2088	51	15	150	900	6	6	82	1267
19	16	586	3563	16	19	161	747	15	13	189	1354
20	17	744	4276	42	16	163	919	50	19	291	1432
23	6	1390	23067	57	23	167	626	14	14	259	1750
25	23	43	87	18	8	175	2088	27	25	500	1900
27	25	500	1900	15	13	189	1354	32	6	127	2017
28	20	1404	6920	13	4	190	4650	18	8	175	2088
29	12	770	6317	49	5	194	3780	55	16	350	2088
30	2	56	2700	56	3	203	6667	47	5	136	2620
31	12	23	92	17	24	226	842	30	2	56	2700
32	6	127	2017	5	5	230	4500	2	5	150	2900
33	25	54	116	14	14	259	1750	53	3	108	3500
35	138	261	89	35	138	261	89	19	16	586	3563
38	2	1063	53050	50	19	291	1432	49	5	194	3780
41	5	487	9640	55	16	350	2088	10	11	439	3891
42	16	163	919	10	11	439	3891	20	17	744	4276
43	24	1362	5575	41	5	487	9640	5	5	230	4500
44	18	1127	6161	27	25	500	1900	13	4	190	4650
47	5	136	2620	19	16	586	3563	43	24	1362	5575
49	5	194	3780	52	7	623	8800	44	18	1127	6161
50	19	291	1432	20	17	744	4276	29	12	770	6317
51	15	150	900	29	12	770	6317	56	3	203	6667
52	7	623	8800	54	10	855	8450	28	20	1404	6920
53	3	108	3500	38	2	1063	53050	54	10	855	8450
54	10	855	8450	44	18	1127	6161	52	7	623	8800
55	16	350	2088	43	24	1362	5575	41	5	487	9640
56	3	203	6667	23	6	1390	23067	23	6	1390	23067
57	23	167	626	28	20	1404	6920	38	2	1063	53050

- o barramento 31, o barramento que entra primeiro em colapso, tem o segundo menor crescimento, 23 %, e o terceiro menor incremento de aumento, 92%. Anteriormente, para o erro de 1%, tinha um aumento de 12 %.

As conclusões da análise aos resultados apresentados na tabela 5.24 e 5.25, indiciam alguma relação entre o crescimento de cargas e o valor das cargas reactivas dos barramentos ou do facto de serem barramentos críticos.

As conclusões realizadas são gerais e pode-se definir como uma característica do novo método FSQV. Por outro lado, este aspecto muito particular do aumento do erro para o dobro provocar, na maioria das cargas, um aumento muito superior ao dobro, consolida esta nova propriedade deste novo método de detecção do ponto do colapso.

Até aqui as simulações foram realizadas com o incremento de carga de um único barramento. A questão que se pode formular, nesta altura, é saber se com a combinação do aumento de cargas de vários barramentos continua a ser válido este método FSQV.

5.4.4.2 – Limite do aumento de carga base em dois barramentos definindo um erro máximo para a grandeza FSQV

Na secção anterior estudou-se a possibilidade de aumentar a carga base em cada um dos 42 barramentos, com carga, da rede de testes de 57 barramentos. O limite dos aumentos de carga correspondeu ao primeiro valor que violava o desvio máximo pré-definido dos valores finais da grandeza FSQV.

Na prática existindo a probabilidade de os aumentos de carga nas redes também acontecerem em dois barramentos, em simultâneo, torna esta análise interessante. A combinação do aumento de carga de dois barramentos para a rede de 57 barramentos, com 42 barramentos com carga, é de 820 combinações. Este número alto de combinações cria um primeiro obstáculo devido ao esforço computacional exigido.

A metodologia a usar será igual à anterior, passando o aumento de carga a ser efectuado em dois barramentos da mesma rede de testes. Como exemplo pode-se referir que, para o caso da combinação dos barramentos 2 e 3, ao fim de oito incrementos o desvio do FSQV violou o erro máximo de 1%. Portanto, para a combinação do aumento de cargas dos barramentos 2 e 3, o aumento máximo admissível para o erro de 1% do FSQV é de 8 %. No outro extremo e para a última combinação de cargas de barramentos, 56 e 57, o aumento de carga possível foi de 1%.

Na tabela C11, do Anexo C, são apresentados os aumentos de cargas. Na tabela 5.26 apresenta-se uma análise estatística dos resultados apresentados na tabela C11.

Como se pode ver na tabela 5.26, 22 combinações de 2 barramentos ultrapassam logo no primeiro aumento de carga de 1%, o erro máximo de 1% no valor final FSQV. Isto significa que o aumento possível da carga está entre 0 e 1%. Outro dado importante é o facto de 58 % das combinações, de 2 barramentos, terem um limite de aumento de carga no intervalo de 0 a 10 %. No outro extremo verifica-se que só 7 combinações de carga ultrapassam o aumento de 100 %. O aumento mais alto é de 234 % de uma única combinação de 2 barramentos.

Tabela 5.26 – Análise estatística dos limites de aumento das cargas base para um erro máximo de 1% no valor final do FSQV para a rede de 57 barramentos (incrementos de 1%)

Crescim. (%)	Quantid. combin. Barram.	Crescim. (%)	Quantid. combin. Barram.	Crescim. (%)	Quantid. combin. Barram.	Crescim. (%)	Quantid. combin. Barram.	Crescim. (%)	Quantid. combin. Barram.
0	22	11	22	22	8	55	1	79	1
1	58	12	39	23	4	58	2	81	1
2	58	13	15	24	1	60	1	82	1
3	53	14	23	24	16	62	1	84	2
4	60	15	18	25	6	64	1	92	1
5	39	16	14	⋮	⋮	66	1	106	2
6	36	17	15	46	3	68	2	126	1
7	40	18	4	49	2	70	2	143	1
8	35	19	11	51	1	72	1	144	1
9	39	20	12	52	1	73	1	163	1
10	35	21	9	54	1	77	1	234	1

Sendo os resultados do aumento de carga, para um erro de 1%, bastante fracos, aumentou o interesse e a motivação para realizar um segundo conjunto de simulações, aumentando o erro para 2%. Justifica-se este aumento do erro, dado que, os resultados anteriormente apresentados na secção anterior, e para um erro de 2 %, foram substancialmente superiores aos encontrados para um erro máximo de 1%

Na tabela C12 do Anexo C são apresentados os aumentos de cargas para o erro de 2% do desvio do valor FSQV. Na tabela 5.27 apresenta-se uma análise estatística dos resultados apresentados nas tabelas C11 e C12, para ser possível comparar as duas situações.

Tabela 5.27 – Comparação dos limites de aumento das cargas base para um erro máximo de 1% e 2 % no valor final do FSQV para a rede de 57 barramentos (incrementos de 1%)

Intervalo crescim.	Erro de 1 %				Erro de 2 %			
	Número de combin.	Percent. do total	Acumulados		Número de combin.	Percent. do total	Acumulados	
			Número de combin.	Percent. do total			Número de combin.	Percent. do total
0 a 10	475	57,9			1	0,1		
20 a 50	313	38,2	788	96,1	187	22,8	188	22,9
50 a 100	23	2,8	811	98,9	171	20,9	359	43,8
100 a 500	9	1,1	820	100,0	400	48,8	759	92,6
500 a 1000					54	6,6	813	99,2
1000 a 1579					7	0,8	820	100,0

Analisando as tabelas C12 e 5.27 conclui-se que:

- os resultados com 2 % são muito superiores aos obtidos com o erro de 1%;
- o crescimento mais baixo é de 10 %, correspondendo à combinação de crescimento de cargas dos barramentos 5 e 12, face às 475 combinações que têm crescimentos até 10 % e tendo 22 crescimentos nulos para o erro de 1%;
- o crescimento mais alto passou a ser 1579 %, correspondendo à combinação de crescimento de cargas dos barramentos 23 e 43, face ao crescimento máximo de 234 % para o erro de 1%;

A tabela 5.28 apresenta os dados estatísticos mais relevantes destes quatro conjuntos de simulações.

Analisando a tabela 5.28 concluiu-se que o tempo gasto com as simulações dependeu do conjunto de simulações. O aumento do erro para 2 % conjugado com o tipo de evolução do erro provocou um grande aumento do tempo total como também do tempo máximo e mínimo da simulação.

O tempo total gasto em cada conjunto de simulações correspondeu à soma dos tempos de ocupação de vários computadores. O tipo de simulações, um por cada barramento ou combinação de crescimento de cargas, permite dividir o cálculo, que no limite poderá ser em

41 ou 820 simulações independentes. Se se usarem técnicas de processamento paralelo assíncrono o tempo total envolvido será reduzido para valores muito aceitáveis.

Tabela 5.28 – Dados estatísticos dos quatro conjuntos de simulações de aumento de cargas nos barramentos da rede de 57 barramentos

Número de Barram.	Erro do FSQV (%)	Número de colapsos	Número de FC	Tempo total (dd.hh.mm)	Tempo máx. da simulação (hh.mm)	Tempo mín. Da simulação (hh.mm)
1	1	615	280.902	00.10.02	01.57	00.04
1	2	15.524	5.518.852	08.06.37	18.06	00.28
2	1	11.494	5.246.174	07.12.51	02.59	00.02
2	2	138.402	49.329.356	72.09.21	17.18	00.10

5.5 – ESTUDO DE CONTINGÊNCIAS UTILIZANDO O MÉTODO FSQV

Nos estudos de estabilidade de tensão, a análise do impacto das contingências é muito importante, para a análise da segurança “n-1” e de ordem superior. Pretende-se com estas simulações analisar o comportamento do novo método FSQV no estudo de contingências de linhas, geradores, transformadores e *shunts* capacitivos.

5.5.1 – Estudo de contingências de linhas/transformadores

As contingências de linhas/transformadores irão ser provocadas por eliminação dos dados referentes à linha/transformador onde se pretende provocar a contingência, na matriz das características das linha/transformador e cujas listagens são apresentadas no anexo A. A construção da matriz das admitâncias, a partir da matriz com as características referidas, irá já reflectir a contingência. Este procedimento equivale a eliminar fisicamente a linha/transformador, o que efectivamente acontece na prática com a abertura dos dois disjuntores de linha/transformador para a sua saída de serviço por actuação das protecções.

5.5.1.1 – Estudo de contingências de linhas/transformadores de 1º nível

5.5.1.1.1 – Estudo de contingências de linhas/transformadores de 1º nível provocadas no ponto de carga base

Na primeira parte desta fase de simulações a contingência irá ser provocada antes do primeiro FC e com a carga base, o que equivale a ser criada no PC 1. Desta forma, a primeira matriz de admitâncias nodais será calculada tendo em conta a alteração provocada pela contingência. De seguida, levar-se-á a rede ao colapso utilizando um FC contínuo com incrementos de carga de 0,1 %, entre FC.

Simulações com a rede de 14 barramentos

Supondo que ocorre uma contingência na linha 2 e que em consequência as protecções retiram definitivamente a linha de serviço devido a uma avaria permanente. O que irá acontecer à grandeza FSQV?

Na figura 5.29 apresentam-se duas curvas FSQV referentes à rede de 14 barramentos, sem contingências ou com contingência na linha 2 provocada no PC 1.

Como se pode ver na figura 5.29, o aparecimento de uma contingência na linha 2, no ponto de carga base, provocou o aparecimento de uma nova curva FSQV em que:

- o FSQV inicial, calculado no primeiro FC, tem um valor de 246,26, que é inferior ao valor FSQV sem incidentes 255,72 (ver tabela 5.7);
- todos os valores FSQV calculados, na simulação com contingência da linha 2, até ao colapso, são inferiores aos valores FSQV sem contingência;
- o FSQV, no FC antes do colapso, tem um valor de 184,94, que é inferior ao valor sem incidentes 193,36 (ver tabela 5.7).

Com o incidente da linha 2, o ponto de colapso da rede é atingido com um crescimento de cargas de 38,7 %. Sem a contingência da linha 2, o ponto de colapso foi atingido com um crescimento de cargas de 76,1 %. Devido ao incidente da linha 2, o PMC sofreu uma redução de 49,21 %.

Para possibilitar a análise dos impactos das contingências no PMC, de todas as linhas desta rede, realizaram-se 20 simulações, uma simulação por linha (ver tabela A2 do anexo A com as características das linhas).

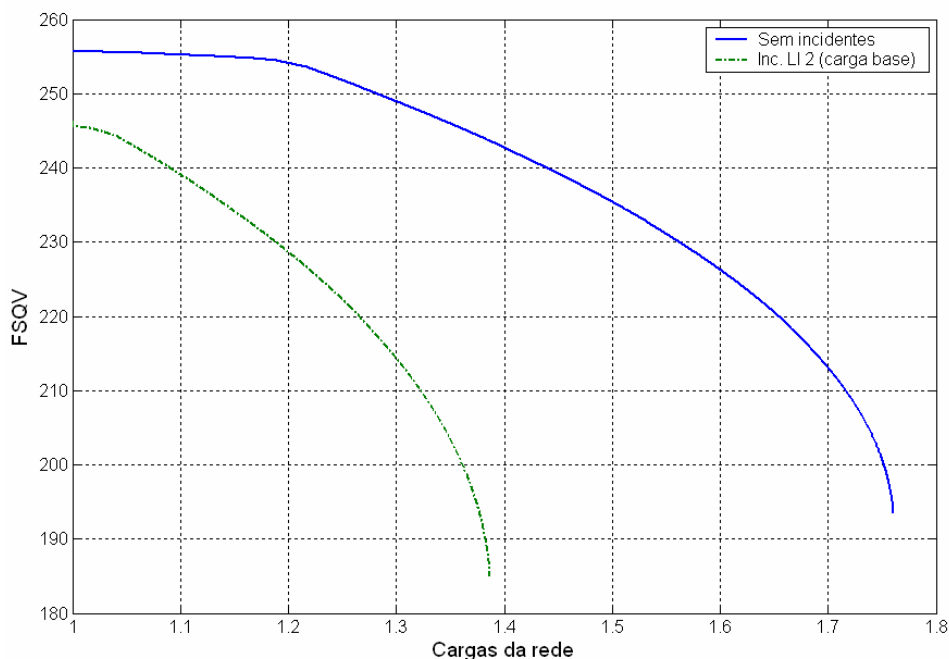


Figura 5.29 – Curvas FSQV referentes à rede de 14 barramentos (sem contingência ou com contingência na linha 2 provocada no PC 1)

Na tabela 5.29 apresentam-se os resultados das 20 simulações de contingências de linhas provocadas na rede de 14 barramentos.

Analisando a tabela 5.29 conclui-se que:

- os impactos das contingências de linha no PMC da rede são todos diferentes e dependentes da importância da linha/transformador para a rede;
- a linha que provoca a pior contingência, em termos de redução do PMC, é a linha Nº 1 (redução de 98,68 %);
- a linha que provoca a menor redução do PMC é a linha Nº 19 (redução de 0,13 %);
- os valores FSQV iniciais e finais são normalmente diferentes dos valores sem contingência e dependentes da linha com contingência;

Tabela 5.29 – Resultados da simulação de contingência de linha para a rede de 14 barramentos

Linha com contingência			Número FC (1)	FSQV		PMC	
Número	Barramento Início	Barramento Fim		Inicial	Final	(%) (2)	Redução (%)
1	1	2	2	222,73	219,48	0,1	98,68
2	1	5	387	246,26	184,94	38,6	49,21
3	2	3	297	245,59	207,5	29,6	61,05
4	2	4	586	244,33	186,13	58,5	23,03
5	2	5	655	244,45	184,62	65,4	13,95
6	3	4	705	245,75	196,89	70,5	7,24
7	4	5	601	211,32	163,12	60,0	21,05
8	4	7	594	245,29	196,26	59,3	21,97
9	4	9	682	251,71	195,00	68,1	10,39
10	5	6	304	247,85	206,91	30,3	60,13
11	6	11	738	246,35	187,46	<u>73,7</u>	3,03
12	6	12	739	248,76	190,11	<u>73,8</u>	2,89
13	6	13	660	241,79	186,34	65,9	13,29
14 (3)	7	8	675	242,04	182,39	67,4	11,32
15	7	9	496	255,72	195,92	49,5	34,87
16	9	10	732	255,72	181,07	<u>73,1</u>	3,82
17	9	14	648	249,61	204,75	64,7	14,87
18	10	11	755	255,72	187,92	<u>75,4</u>	0,79
19	12	13	760	255,72	189,81	<u>75,9</u>	0,13
20	13	14	734	250,62	194,24	<u>73,3</u>	3,55
Sem contingências			761	255,72	193,36	76,0	0
(1) – Até ao colapso; (2) – Crescimento de cargas em relação às cargas base da rede de simulação; (3) – Esta contingência provoca a perda do barramento N°8							

- a contingência na linha N° 7 provoca o valor inicial mais baixo (211,32) e também o valor final mais baixo (163,12);
- o incidente da linha 14 que corresponde à linha entre o barramento 7 e 8 (ver tabela A2 do anexo A com as características das linhas) é o único que provoca a perda de um barramento, N° 8, por ser a única linha ligada a este barramento (ver figura 5.1 com o esquema unifilar da rede de 14 barramentos);
- em consequência da contingência da linha 1, o gerador do barramento 2 (PV) ultrapassa no primeiro FC o seu limite de produção de energia reactiva, pelo que no segundo FC é fixado o valor de produção no valor limite, o que origina a rede entrar

em colapso. No primeiro FC a produção deste gerador foi de 0,8 pu, mas como no segundo FC é limitada a produção a 0,5 pu, esta limitação de produção de energia reactiva é suficiente para provocar o colapso da rede. Na prática o colapso era simultâneo com a ocorrência da contingência.

Na figura 5.30 apresentam-se as reduções do PMC provocadas pelas contingências de linha da rede de testes de 14 barramentos.

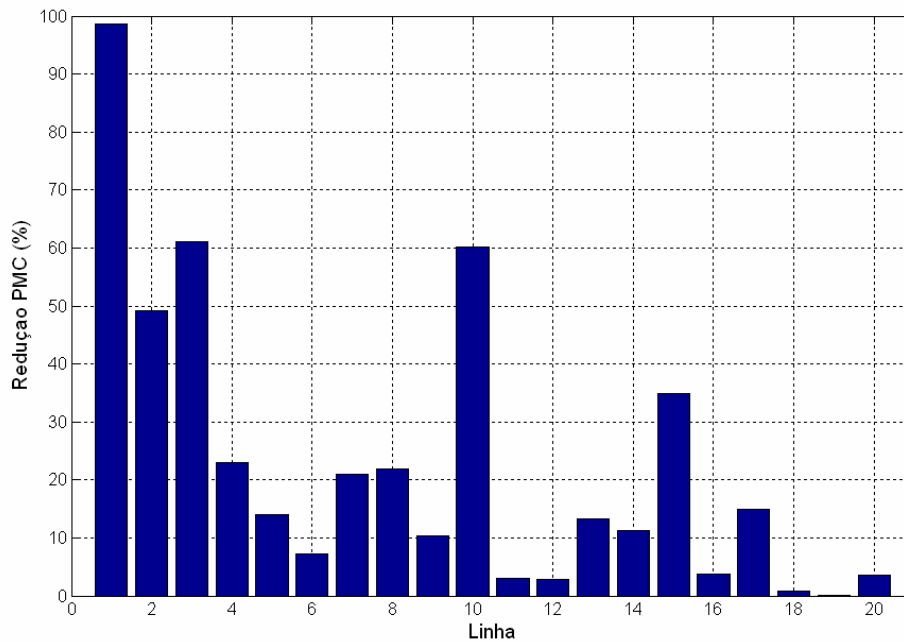


Figura 5.30 – Reduções dos PMC provocadas por contingências de linha de 1ª ordem na rede de testes de 14 barramentos

Outra análise interessante, que se realizou foi a comparação das curvas FSQV entre a curva sem contingência e as 19 curvas correspondentes às 19 simulações de contingência de linha/transformador, com excepção da contingência da linha número 1, pela razão já referida anteriormente.

Como se pode ver na figura 5.31, todas as curvas FSQV e referentes às 19 contingências de linhas, estão abaixo da curva sem contingência o que provoca sempre uma redução do PMC (ver tabela 5.29). Todas as referidas curvas são distintas, isto é não existem curvas sobrepostas, ou seja, cada contingência de linha tem uma curva característica, sendo o andamento de cada curva dependente da linha com contingência.

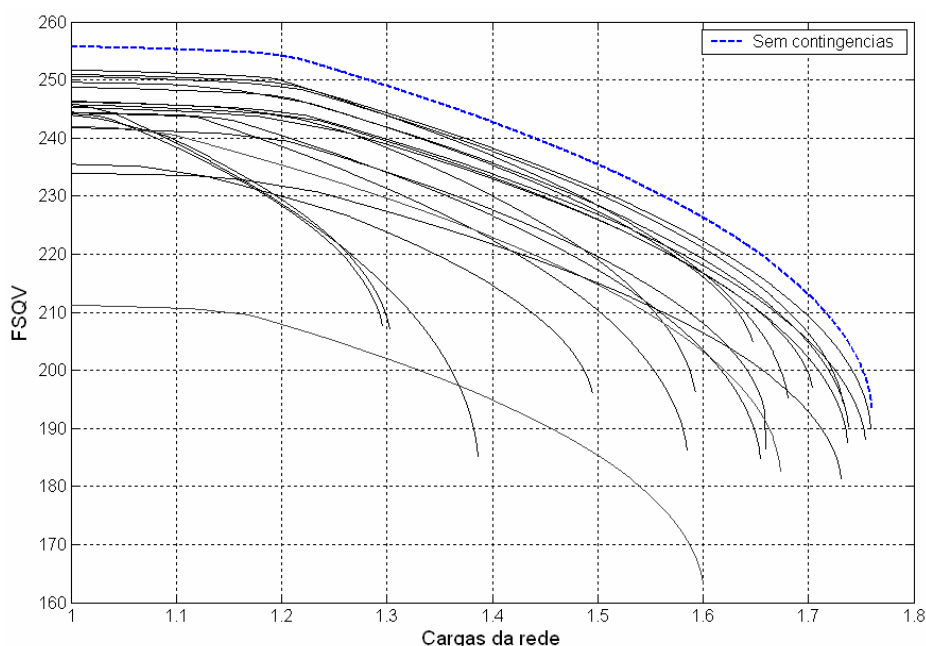


Figura 5.31 – Curvas FSQV correspondentes à simulação sem contingência e às 19 contingências provocadas no ponto de carga base (rede de testes de 14 barramentos)

Na figura 5.32 apresentam-se as seis curvas FSQV correspondentes às contingências que provocam as seis maiores reduções do PMC, marcadas a cheio na tabela 5.29, não tendo em consideração a contingência da linha número 1.

Na figura 5.33 apresentam-se as seis curvas FSQV correspondentes às contingências que provocam as seis menores reduções do PMC, marcadas a sublinhado na tabela 5.29.

Como se pode ver na figura 5.32, as curvas FSQV correspondentes às contingências das linhas 3 e 10 são muito parecidas mas correspondem: a primeira à linha entre os barramentos 2 e 3; a segunda ao transformador entre os barramentos 5 e 6 (ver tabela A2 do anexo A com as características das linhas). Mesmo sendo a primeira, uma linha, e a segunda, um transformador, a sua saída da rede, afecta de uma forma muito semelhante a grandeza FSQV. Por outro lado, as linhas que provocaram as contingências mais penalizantes em termos de PMC, linha 1 mais as seis piores contingências, localizam-se todas no mesmo escalão de tensão. As primeiras 4 (linha 1 a 4) correspondem às mais importantes linhas do escalão de produção e as últimas 3 (8, 10 e 15) aos dois transformadores que interligam o andar de produção com o andar de distribuição (ver figura 5.1 com o esquema unifilar da rede de 14 barramentos). Existe, assim, um factor que relaciona as contingências mais penalizantes e o escalão a que pertencem.

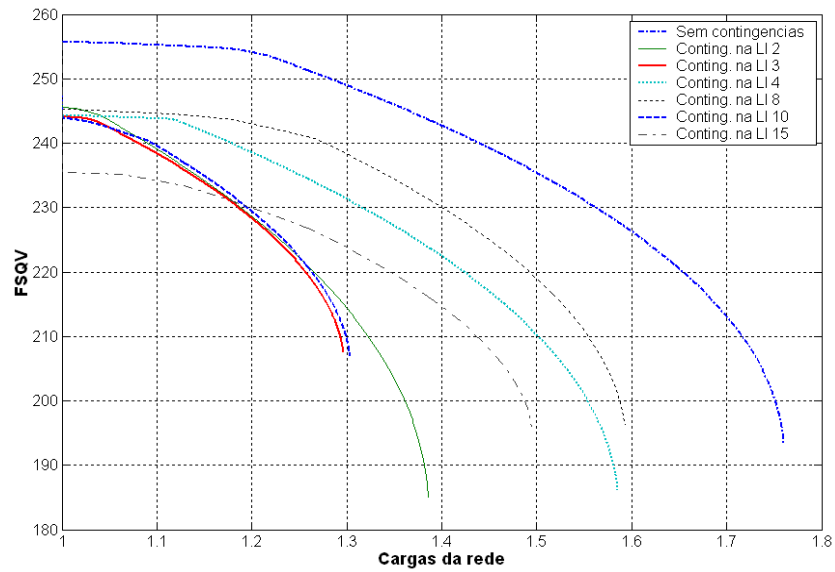


Figura 5.32 – Curvas FSQV referente às 6 piores contingências de linhas/transformadores da rede de 14 barramentos

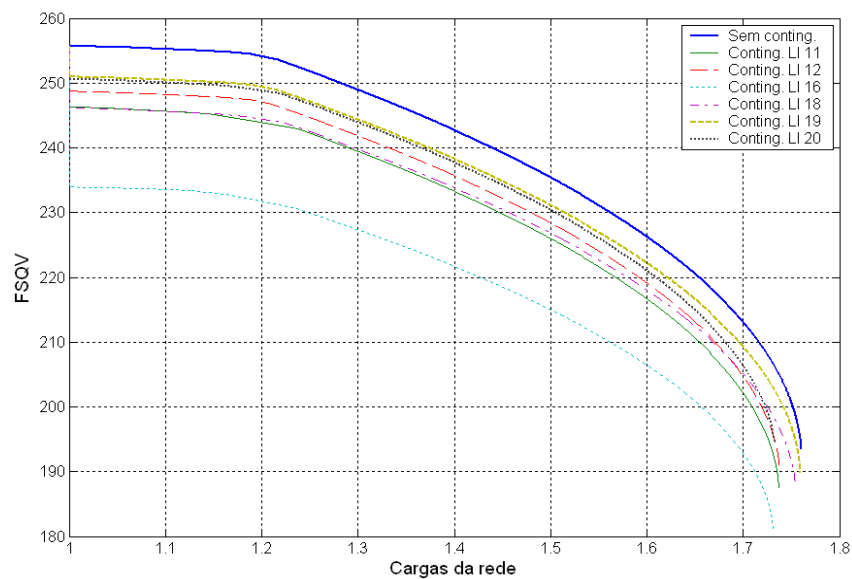


Figura 5.33 – As curvas FSQV referente às 6 contingências de linhas/transformadores menos penalizantes da rede de 14 barramentos

De igual forma, existe um factor que relaciona as contingências menos penalizantes em termos de PMC. Todas as contingências correspondem a linhas do escalão de distribuição, tendo as cargas dos barramentos a elas ligadas, várias possibilidades de alimentação, por estar adoptada a exploração em anel fechado, e por isso, caso saiam de serviço não

provocam perda de carga (ver figura 5.1 com o esquema unifilar da rede de 14 barramentos).

Simulações com a rede de 57 barramentos

Para as simulações com a rede de 57 barramentos usou-se a mesma metodologia utilizada para rede de 14 barramentos. Como esta rede tem 80 linhas/transformadores, realizaram-se 80 simulações, correspondendo uma simulação por linha/transformador (ver tabela A4 do anexo A com as características das linhas).

Na tabela 5.30 apresentam-se os resultados, considerados mais importantes por provocarem os maiores e menores impactos, das simulações de contingências na rede de 57 barramentos. Nas tabelas C13 e C14 do Anexo C são apresentados, na globalidade, os resultados das simulações de contingência, indexados por ordem crescente de N° de linha e ordem decrescente de redução do PMC.

Tabela 5.30 – Resultados considerados mais importantes da simulação de contingências de Linha para a rede de 57

Linha/Transformador (com contingência)			Número FC (1)	FSQV		PMC	
Número	Barramento Início	Barramento Fim		Inicial	Final	(%) (2)	Redução (%)
19	4	18	0	0	0	0	100,00
20	4	18	0	0	0	0	100,00
35	24	25	0	0	0	0	100,00
36	24	25	0	0	0	0	100,00
48	35	36	0	0	0	0	100,00
42	25	30	30	1446,9	1439,3	2,9	92,86
46	34	32	69	1453,6	1438,7	6,8	83,25
47	34	35	69	1437,4	1421,9	6,8	83,25
41	7	29	102	1388,4	1316,9	10,1	75,12
50	37	38	172	1410,7	1338,2	17,1	57,88
15	1	15	209	1434,7	1202,4	20,8	48,77
62	48	49	406	1454,3	1206,4	40,5	<u>0,25</u>
31	21	20	407	1465,1	1210,5	40,6	<u>0,00</u>
32	21	22	407	1455,1	1202,8	40,6	<u>0,00</u>
75	56	42	407	1462,9	1202,1	40,6	<u>0,00</u>
52	36	40	408	1439,3	1179,1	40,7	<u>-0,25</u>
73	40	56	408	1467,6	1199,5	40,7	<u>-0,25</u>
45	32	33	430	1446,1	1168	42,9	<u>-5,67</u>
(1) – Até ao colapso							
(2) – Crescimento de cargas em relação às cargas base da rede de simulação							

Analisando as tabelas 5.30, C12 e C13 do Anexo C conclui-se que:

- os impactos das contingências de linha são todos diferentes e dependentes da importância da linha para a rede de simulação utilizada nos testes, como já se tinha verificado para a rede de 14 barramentos;
- no primeiro FC os valores FSQV iniciais são inferiores, em relação aos valores sem contingência (1467,1), com excepção da linha 73 que é ligeiramente superior (1467,6), e os valores finais vão depender da linha/transformador com contingência;
- a contingência dos transformadores Nº 19, 20, 35, 36 e a linha Nº 48, provoca logo o colapso da rede no primeiro FC, ou seja, provoca a redução do PMC em 100 %;
- o incidente da linha 45, que corresponde à linha entre o barramento 32 e 33, é o único que provoca a perda de um barramento, o Nº 33, por ser a única linha ligada a este barramento (ver figura 5.2 com o esquema unifilar da rede de 57 barramentos);
- a saída da linha Nº 45 provoca o maior aumento do PMC, 5,67 %, por perda de carga da rede de simulação, havendo mais duas linhas, 52 e 73, que provocam um aumento do PMC de 0,25 %;
- a saída das linhas 31, 32 e 75 não afectam o PMC.

Na figura 5.34 apresentam-se as reduções do PMC provocadas pelas contingências de linha/transformador da rede de testes de 57 barramentos.

Na figura 5.35 e 5.36 apresentam-se as seis curvas FSQV correspondentes às contingências que provocam as seis maiores reduções do PMC, valores a cheio da tabela 5.30, e às seis menores reduções do PMC, valores sublinhados na mesma tabela.

Como se pode ver na figura 5.35, só a curva FSQV correspondente à contingência da linha 15 é que é parecida com a curva FSQV sem contingências, mas as curvas correspondentes às seis menores reduções do PMC, são todas parecidas com a curva FSQV sem contingências, ver figura 5.36.

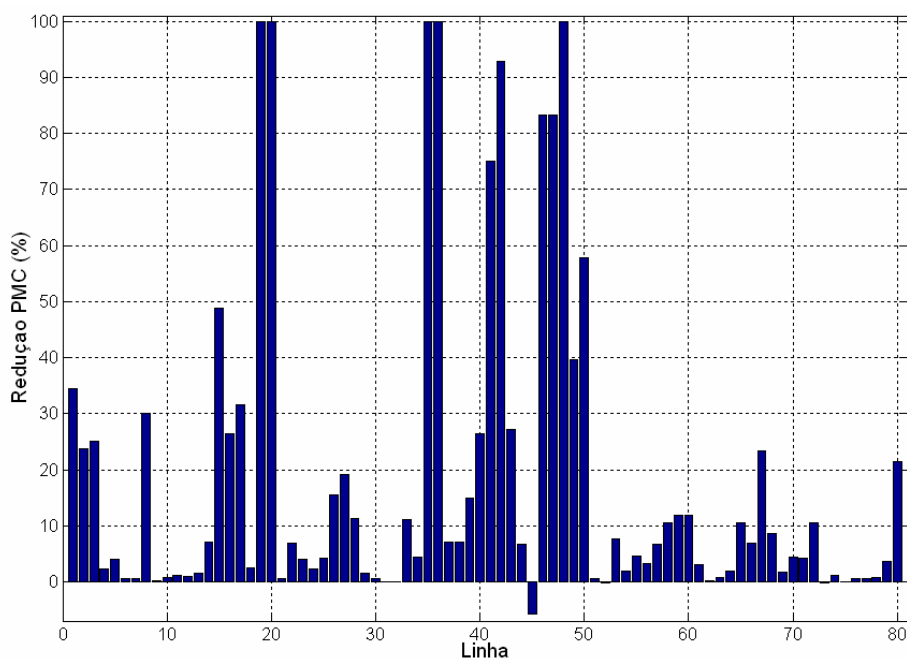


Figura 5.34 – Reduções dos PMC provocadas por contingências de linha de 1ª ordem na rede de testes de 57 barramentos

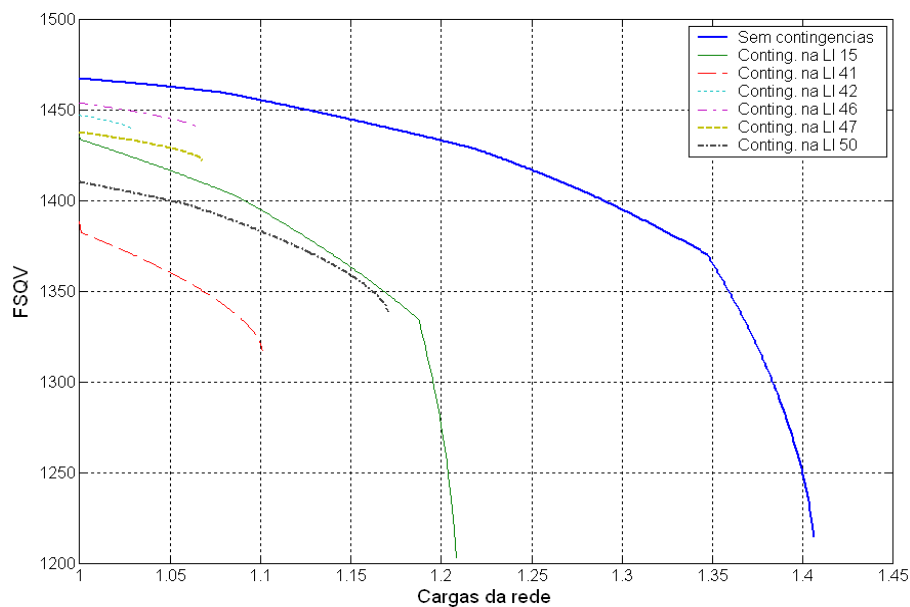


Figura 5.35 – As curvas FSQV referente às 6 piores contingências de linhas da rede de 57 barramentos do IEEE

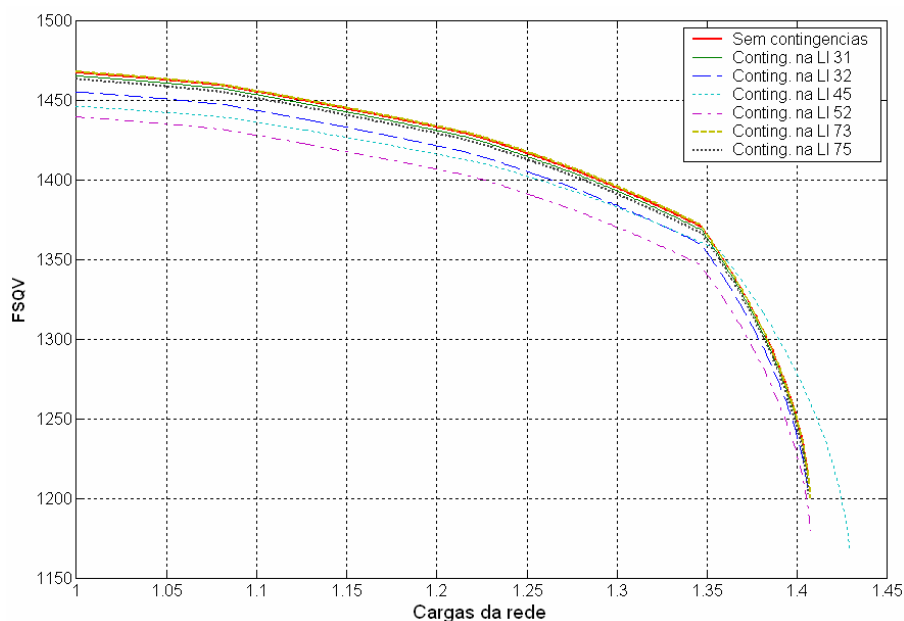


Figura 5.36 – As curvas FSQV referente às 6 menos penalizantes contingências de linha/transformador da rede de 57 barramentos

5.5.1.1.2 – Estudo de contingências de linhas de 1º nível provocadas num ponto de carga arbitrário

Na primeira parte desta fase de simulações as contingências foram provocadas antes do primeiro FC o que correspondeu sempre ao ponto de carga base. Caso a contingência ocorra num ponto de carga diferente do ponto de carga base o que acontece?

Simulações com a rede de 14 barramentos

As contingências foram todas provocadas na linha 2, nos pontos de carga (PC) 1,1, 1,2, 1,3, 1,38, 1,385, 1,39 e 1,6 que correspondem aos incrementos de carga de 10, 20, 30, 38, 38,5, 39 e 60 %. As primeiras três contingências foram provocadas antes do PC 1,386 (PMC 38,6), que corresponde ao ponto de colapso da rede, com contingência na linha 2 provocada no PC 1 (ver tabela 5.29). A quarta contingência foi provocada no FC anterior ao PC 1,386, ou seja, no PC 1,385. A quinta contingência foi provocada logo após o colapso, PC 1,39, e a sexta foi provocada antes do colapso da rede sem contingência.

Nas figuras 5.37 a 5.43 apresentam-se as curvas FSQV referentes às sete contingências provocadas na linha 2 da rede de 14 barramentos.

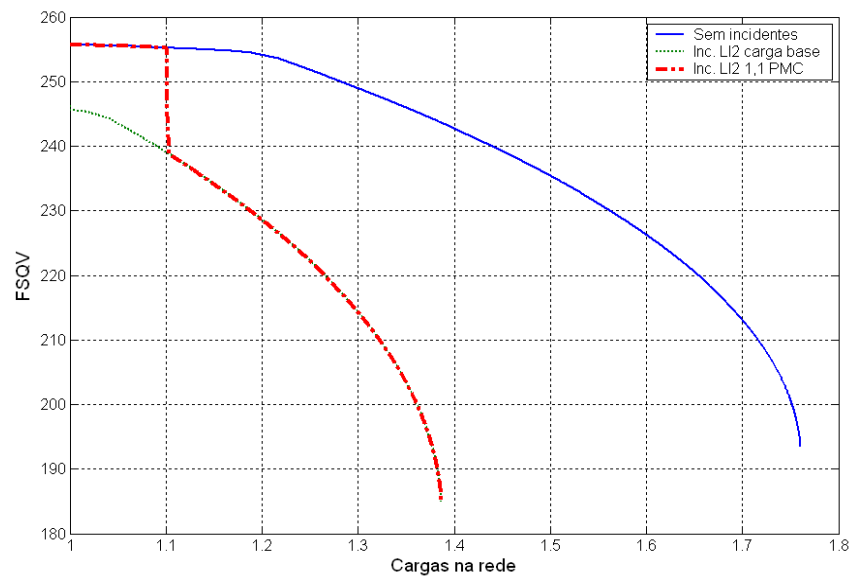


Figura 5.37 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 2 provocada nos PC 1 e 1.1 (rede de 14 barramentos)

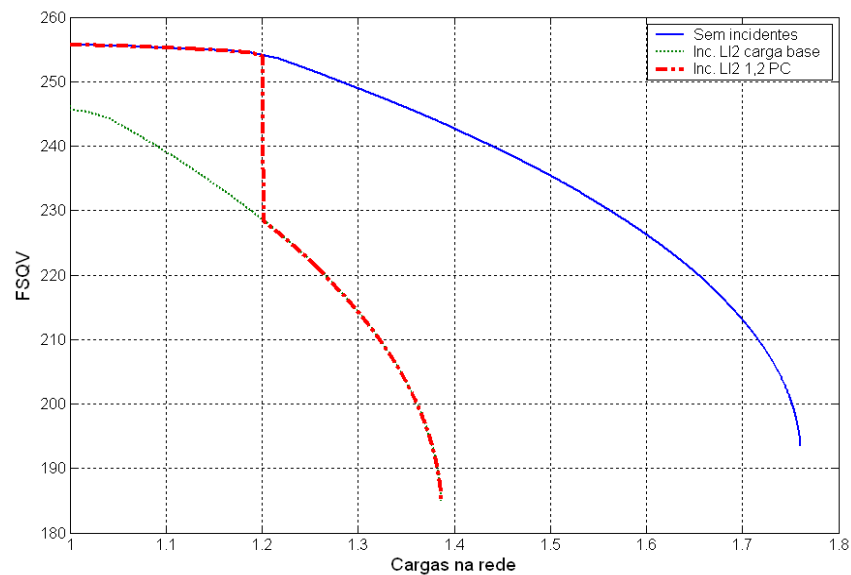


Figura 5.38 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 2 provocada nos PC 1 e 1.2 (rede de 14 barramentos)

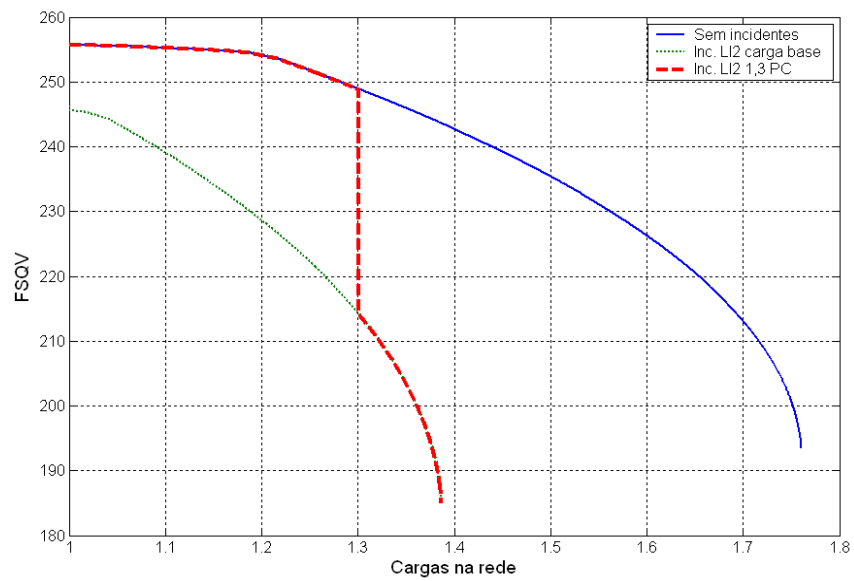


Figura 5.39 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 2 provocada nos PC 1 e 1.3 (rede de 14 barramentos)

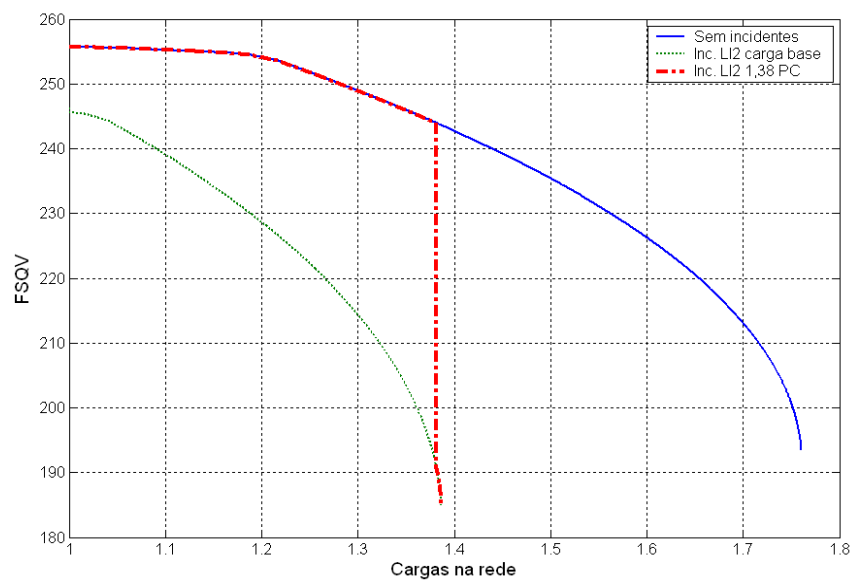


Figura 5.40 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 2 provocada nos PC 1 e 1.38 (rede de 14 barramentos)

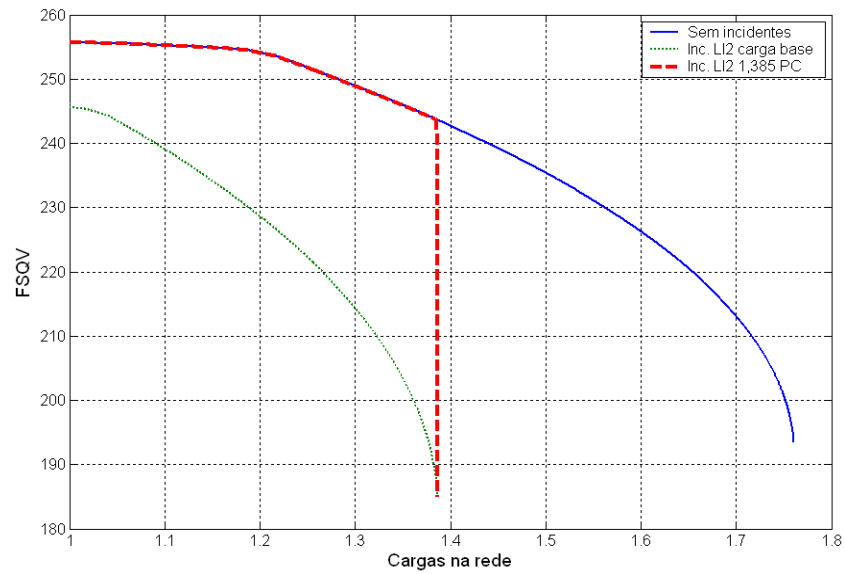


Figura 5.41 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 2 provocada nos PC 1 e 1.385 (rede de 14 barramentos)

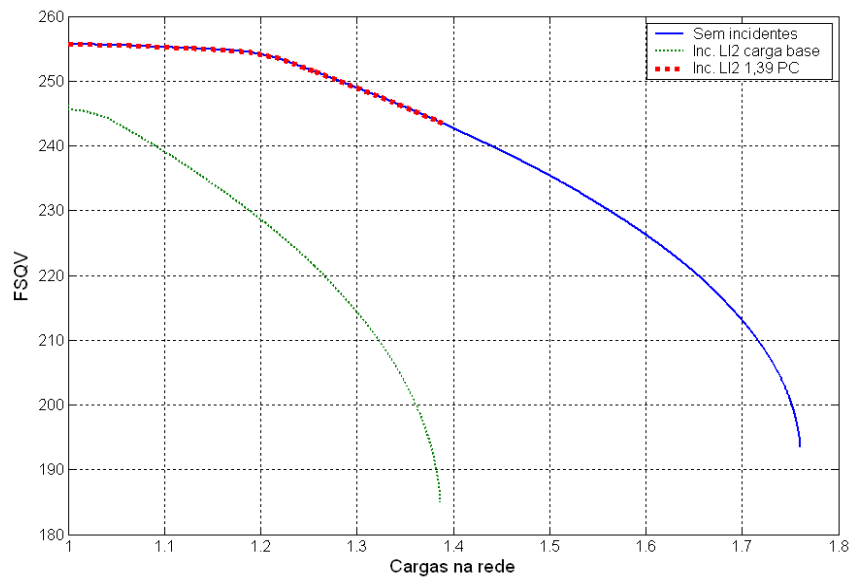


Figura 5.42 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 2 provocada nos PC 1 e 1.39 (rede de 14 barramentos)

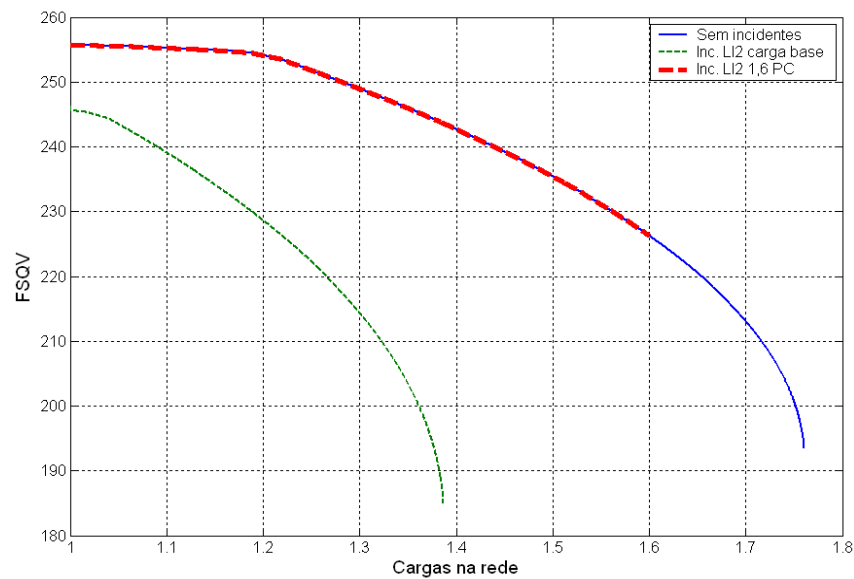


Figura 5.43 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 2 provocada nos PC 1 e 1.6 (rede de simulação de 14 barramentos)

Analisando as figuras 5.37, ..., 5.43 constata-se que:

- nas situações em que as contingências foram provocada antes do PC 1,386, que corresponde ao PMC com contingência na linha 2 provocada no PC 1, verifica-se que os valores FSQV:
 - até ao PC onde foi provocada a contingência, os valores FSQV são iguais à curva sem contingência, e por essa razão, as duas curvas mantêm-se sobrepostas, já que ambas não têm contingências;
 - a partir do PC onde foi provocada a contingência, os valores FSQV passam a ser iguais aos valores da curva com contingência na linha 2 provocada no PC 1, mantendo-se as duas curvas sobrepostas até ao colapso, por terem ambas a mesma contingência;
- quando a contingência foi provocada num PC superior ao ponto de colapso da linha 2, com contingência provocada no PC 1 (PC 1,386), no FC seguinte foi atingido o colapso da rede e consequentemente manteve-se sobreposta à curva sem contingência.

Simulações com a rede de 57 barramentos

Usando a mesma metodologia utilizada para a rede de 14 barramentos, realizaram-se simulações com a rede de 57 barramentos. Pretendeu-se confirmar os resultados já obtidos para as contingências de linhas criadas num ponto de funcionamento arbitrário da primeira rede de testes.

Para a realização de simulações escolheram-se duas linhas que provocaram uma substancial redução do PMC, linhas 41 e 42 (ver tabela 5.30).

As contingências a provocar na linha 41, serão nos PC 1.05 e 1.2, que corresponde respectivamente ao ponto de funcionamento antes do colapso da rede com contingência da linha 41 e provocada no PC 1, e ao ponto de funcionamento depois do mesmo colapso da rede.

Nas figuras 5.44 e 5.45 apresentam-se as curvas referentes às duas contingências criadas na linha 41.

As contingências na linha 42 foram provocadas nos PC 1.015 e 1.04, correspondendo o primeiro ponto de funcionamento a um PC antes do colapso da rede com contingência da linha 42, e o segundo, a um PC depois do mesmo colapso da rede.

Nas figuras 5.46 e 5.47 apresentam-se as curvas referentes às duas contingências criadas na linha 42.

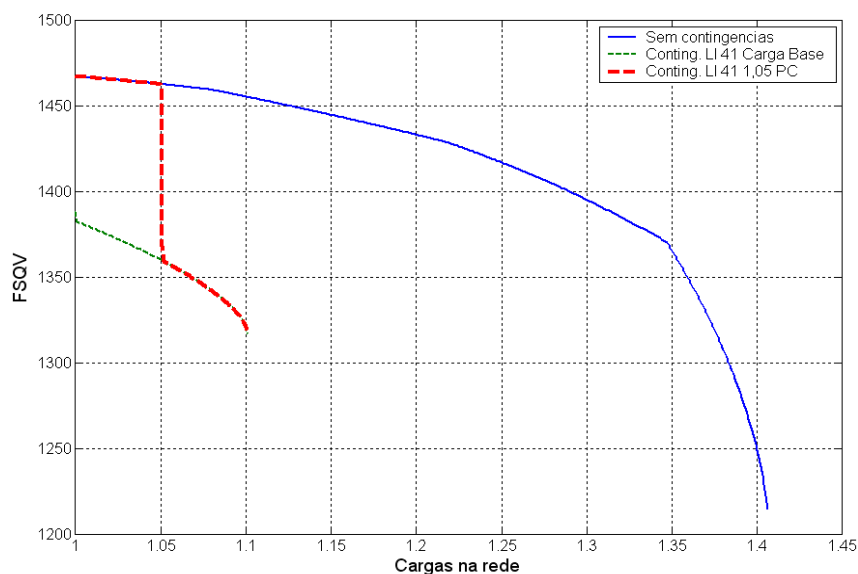


Figura 5.44 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 41 provocada nos PC 1 e 1.05 (rede de 57 barramentos)

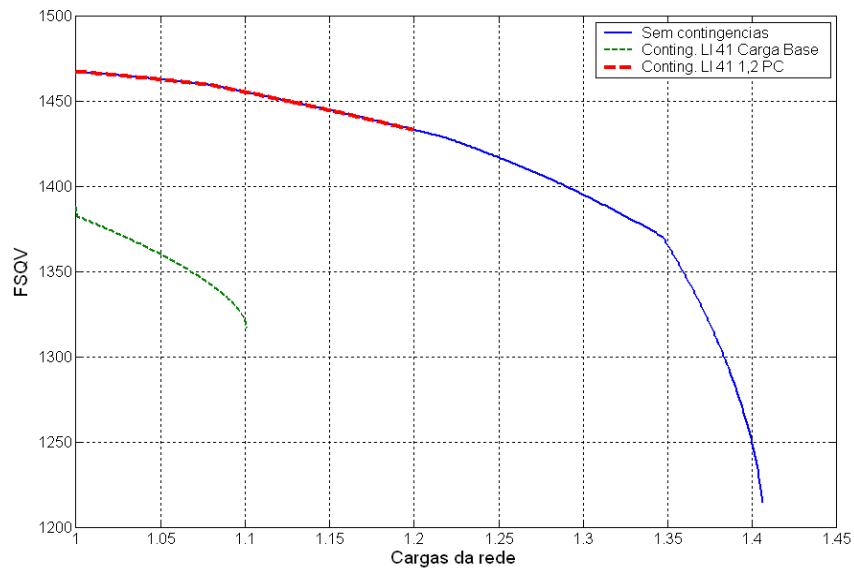


Figura 5.45 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 41 provocada nos PC 1 e 1.2 (rede de 57 barramentos)

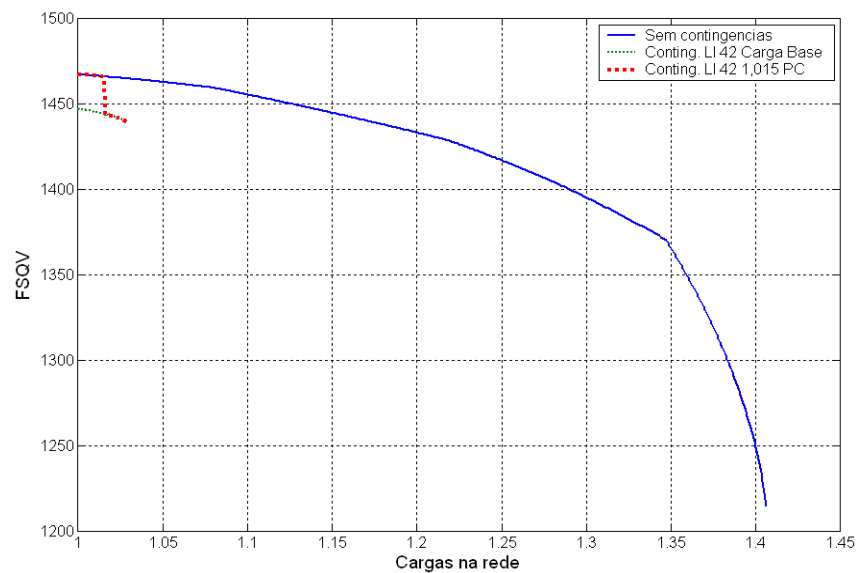


Figura 5.46 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 42 provocada nos PC 1 e 1.015 (rede de 57 barramentos)

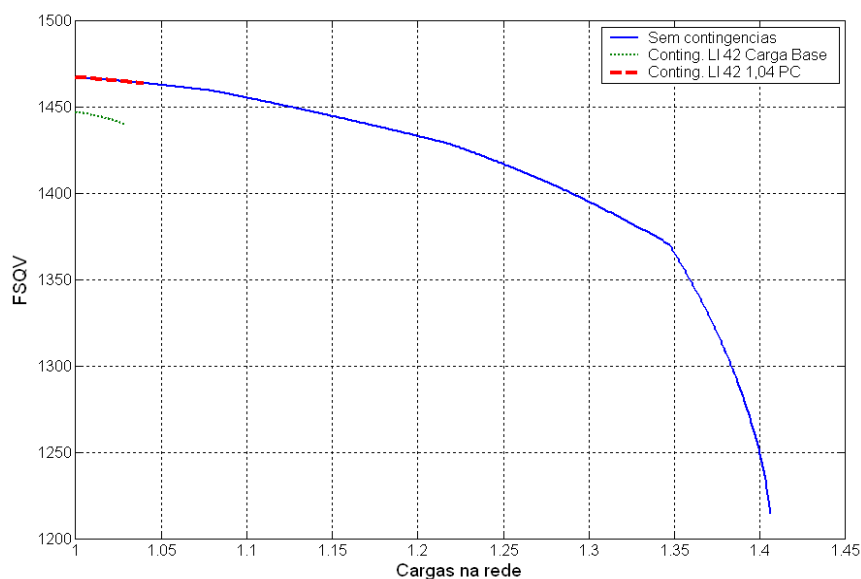


Figura 5.47 – Curva FSQV sem contingência e com contingência na LI 42 provocada nos PC 1 e 1.04 (rede de 57 barramentos)

A análise às figuras 5.44 a 5.47 confirma as conclusões realizadas para o mesmo tipo de contingência para a rede de 14 barramentos.

As contingências definidas num PC arbitrário para linhas ou transformadores das duas redes de testes provocaram todas o mesmo comportamento na grandeza FSQV. Fica assim definido um comportamento padrão para o método FSQV, perante este tipo de contingências e para estas duas redes de testes.

5.5.1.2 – Estudo de contingências de linhas de 2º nível

O estudo do impacto na estabilidade de tensão das contingências de 2º nível são importantes, já que, em situações adversas podem ocorrer. No caso de estudo, analisado no capítulo 3, esta situação ocorreu. As contingências de 2º nível correspondem ao aparecimento em simultâneo ou desfasadas no tempo de duas contingências de linhas/transformadores.

Utilizando a mesma metodologia usada para o estudo de contingências de linhas de primeiro nível realizaram-se simulações de contingências de segundo nível para avaliar o comportamento do novo método FSQV de análise de estabilidade de tensão.

Simulações com a rede de 14 barramentos do IEEE

Em primeiro lugar foram realizadas três simulações, todas no PC 1, contingências das linhas 3 e 8, e a terceira das mesmas linhas, mas em simultâneo. Num segundo conjunto de simulações foram aplicadas, as mesmas contingências, às linhas 2 e 4.

Nas figuras 5.48 e 5.49 apresentam-se as curvas FSQV referentes à rede sem incidentes, com um incidente em cada uma das linhas 2 e 4 ou 3 e 8, com dois incidentes em simultâneo nas linhas 2 e 4 ou linhas 3 e 8, todas provocadas no PC1.

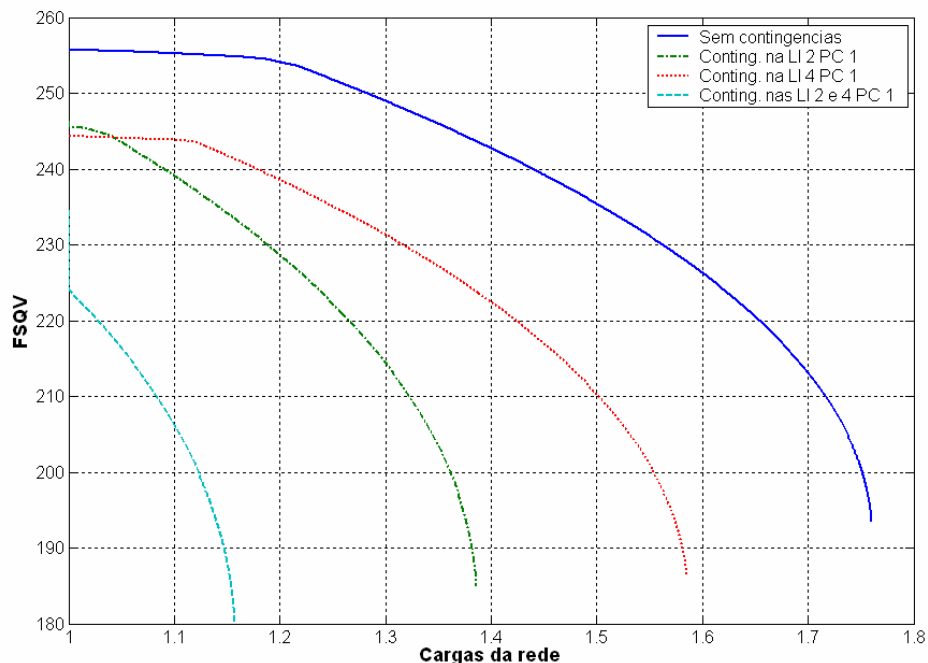


Figura 5.48 – Curvas FSQV referentes à rede de 14 barramentos (sem contingências, conting. LI 2, conting. LI 4, e conting. LI 2 e 4 em simultâneo)

Na análise às figuras 5.48 e 5.49 constata-se que:

- ambos os conjuntos de simulações originaram o mesmo tipo de comportamento das curvas FSQV, ou seja, as curvas FSQV correspondentes ao cenário de duas contingências provocadas em simultâneo e no PC 1, são independentes das duas curvas resultantes da contingência individual provocada no mesmo ponto de funcionamento;
- não se consegue relacionar os impactos no PMC das contingências individuais com as simultâneas, como se pode ver na tabela 5.31:

- no primeiro caso a soma das reduções individuais do PMC (72,24) é inferior à redução da contingência das duas linhas em simultâneo (79,34);
- no segundo caso a soma das reduções individuais do PMC (83,03) é muito superior à redução da contingência das duas linhas em simultâneo (63,95).

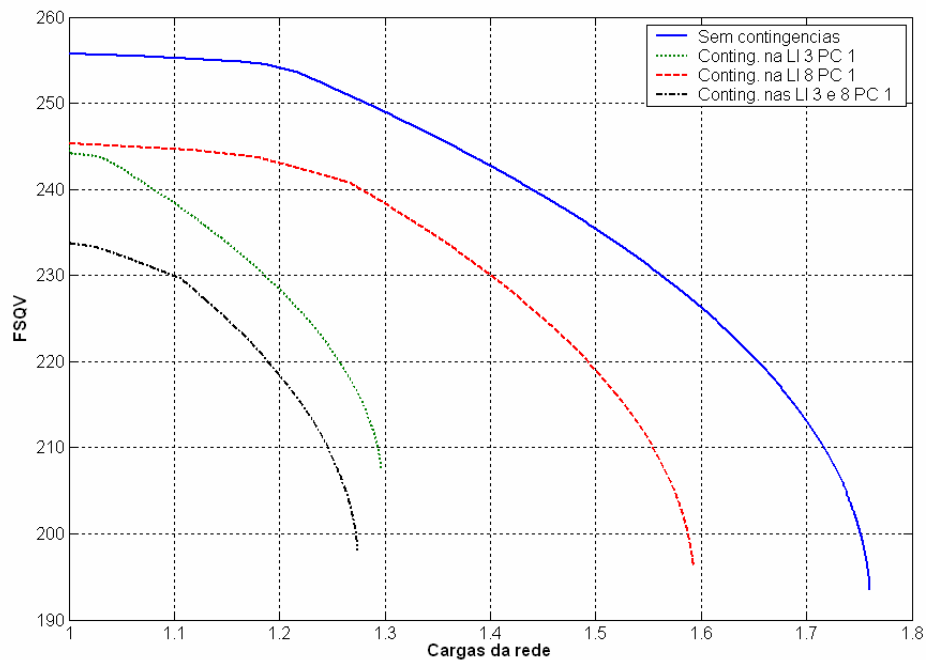


Figura 5.49 – Curvas FSQV referentes à rede de 14 barramentos (sem contingências, conting. LI 3, conting. LI 8, e conting. L3 e 8 em simultâneo)

Tabela 5.31 – Impacto no PMC das contingências de 2º nível para a rede de 14 barramentos

Contingência		PMC	
Número linha	PC	(%) (1)	Redução (%)
sem	1	76,0	0
2	1	38,6	49.21
4	1	58,5	23.03
2 e 4	1	15,7	79.34
3	1	29,6	61.05
8	1	59,3	21.97
3 e 8	1	27,4	63.95
(1) - Crescimento de cargas em relação às cargas base da rede de simulação;			

Uma hipótese provável para explicar as diferenças nas reduções do PMC, anteriormente analisadas, poderá estar nos limites de produção de energia reactiva produzida que possivelmente se alteram com as contingências.

Em segundo lugar foram realizadas 4 simulações, com a mesma rede de teste, criando:

- na primeira simulação, a primeira contingência foi provocada na linha 2 no PC 1.1, e a segunda contingência foi provocada na linha 4 no PC 1.15, sendo ambas provocadas num PC inferior ao ponto de colapso da rede correspondente à existência das duas contingências em simultâneo e provocadas no PC 1;
- na segunda simulação, a primeira contingência foi provocada na linha 2 no PC 1.1, e a segunda contingência na linha 4 no PC 1.2, sendo a primeira provocada num PC inferior ao ponto de colapso da rede correspondente à existência das duas contingências em simultâneo e provocadas no PC1, e a segunda num ponto superior;
- na terceira simulação, a primeira contingência foi provocada na linha 8 no PC 1.2 e a segunda contingência na linha 3 no PC 1.25, sendo ambas provocadas num PC inferior ao ponto de colapso da rede correspondente à existência das duas contingências em simultâneo e provocadas no PC1;
- na quarta simulação a primeira contingência foi provocada na linha 8 no PC 1.1 e a segunda contingência na linha 3 no PC 1.4, sendo a primeira provocada antes e a segunda depois do ponto de colapso da rede correspondente às duas contingências em simultâneo e provocadas no PC1.

Nas figuras 5.50 a 5.53 são apresentadas as curvas FSQV referentes às quatro simulações definidas acima.

Analisando as figuras 5.50 a 5.53 concluiu-se que o comportamento das curvas FSQV, com uma segunda contingência, é igual ao provocado com uma contingência num PC arbitrário, já analisado na secção anterior, ou seja, perante uma segunda contingência os valores FSQV passaram a ser iguais aos da curva FSQV obtida com as duas contingências provocadas em simultâneo e no PC1. Quando a segunda contingência foi provocada após o PMC desta última curva FSQV referida, a rede entrou em colapso.

Os resultados obtidos confirmam mais uma vez a existência de um comportamento típico deste novo método de estudo de estabilidade de tensão.

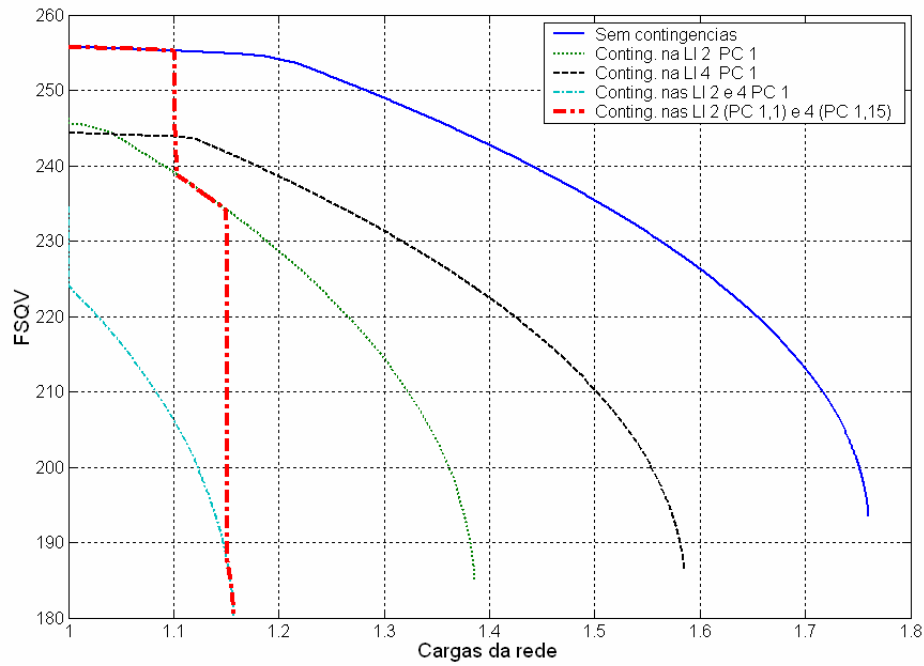


Figura 5.50 – Curvas FSQV referentes às contingências provocadas na rede de 14 barramentos: sem conting.; conting. LI 2 (PC 1); conting. LI 4 (PC 1); conting. LI 2 (PC 1,1); e LI 4 (PC1,15)

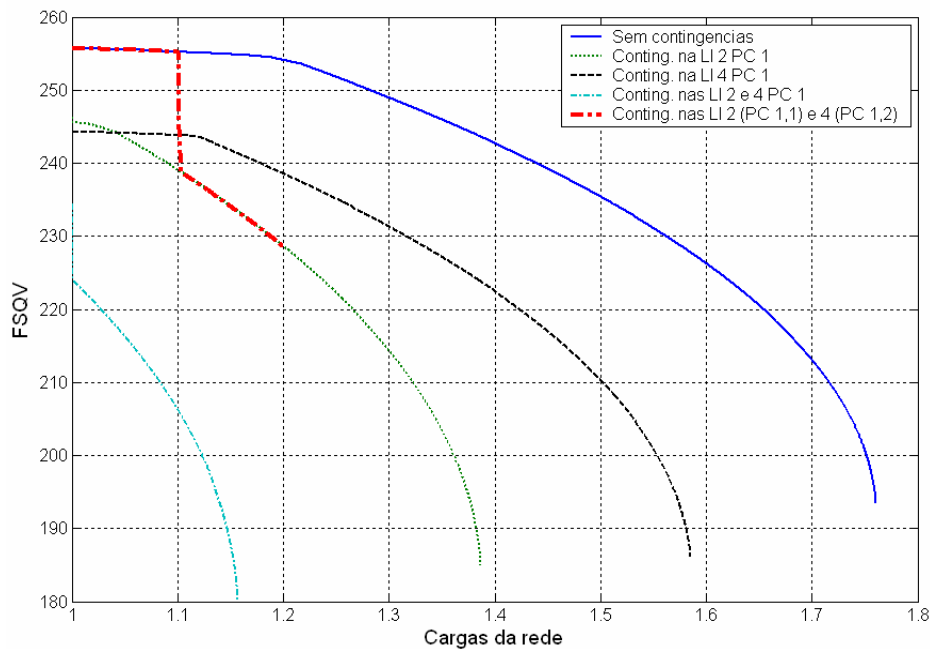


Figura 5.51 – Curvas FSQV referentes às contingências provocadas na rede de 14 barramentos: sem conting.; conting. LI 2 (PC 1); conting. LI 4 (PC 1); conting. LI 2 (PC 1,1); e LI 4 (PC1,2)

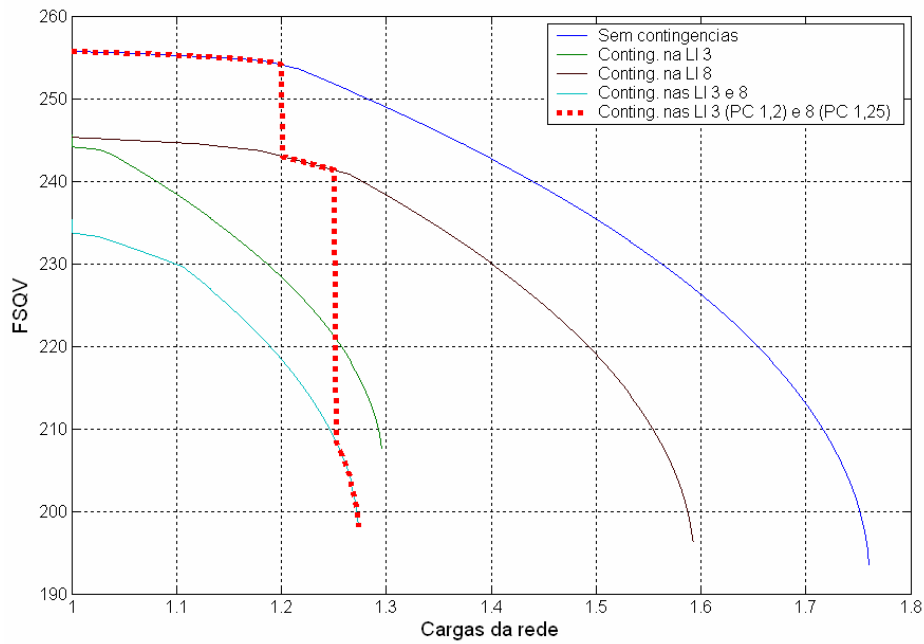


Figura 5.52 – Curvas FSQV referente às contingências provocadas na rede de 14 barramentos: sem contingências; conting. LI 3 (PC 1); conting. LI 8 (PC 1); conting. LI 3 (PC 1,2); e LI 8 (PC1,25)

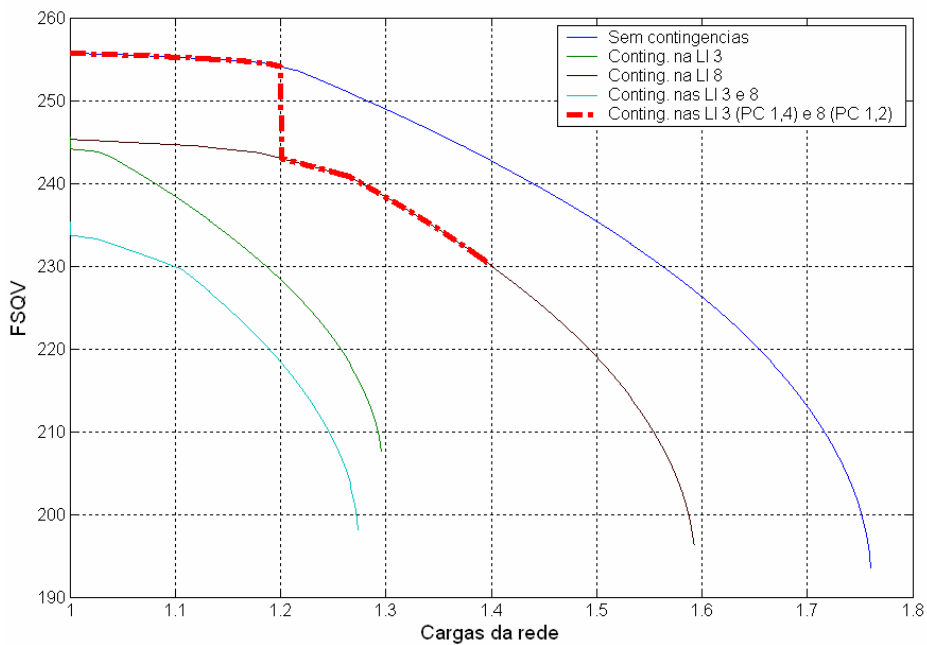


Figura 5.53 – Curvas FSQV referente à rede de 14 barramentos: sem contingências; conting. LI 3 (PC 1); conting. LI 8; e conting. LI 8 (PC 1,2); e LI 3 (PC 1,4)

5.5.2 – Estudo de contingências de geradores

As contingências de geradores serão provocadas por eliminação dos dados referentes ao gerador onde se pretende provocar a contingência, na matriz das características dos barramentos (ver tabelas A1 e A3 do anexo A). Consequentemente, ao anular os dados de um gerador, o barramento que era do tipo PV, passa a só ter carga, o que significa, que passa a ter um comportamento de barramento PQ e a ser considerado como tal nos FC.

5.5.2.1 – Estudo de contingências de geradores de 1º nível

5.5.2.1.1 – Estudo de contingências de geradores de 1º nível provocadas no PC 1

Utilizando a mesma metodologia usada nas contingências de linhas, nesta primeira parte desta fase de simulações, a contingência foi provocada no PC 1. O carregamento da rede, para levar a rede ao colapso, foi realizado um FC contínuo com incrementos de carga de 0,1 %, entre FC, para manter uma uniformidade nas simulações.

Simulações com a rede de 14 barramentos

A primeira contingência foi provocada no gerador do barramento 2, simulando a saída de sincronismo do referido gerador, em consequência da actuação definitiva de protecções que, por exemplo, poderá ser devido a um sobreaquecimento da chumaceira de impulso.

Como se pode ver na figura 5.54, o aparecimento de uma contingência no gerador 2, no PC 1, provocou o aparecimento de uma nova curva FSQV. O andamento da nova curva FSQV, é muito parecida com a curva sem contingências. A grande diferença entre as duas curvas é o ponto de quebra. Na nova curva localiza-se no PC 1.1, tendo a curva FSQV sem contingências o mesmo ponto de quebra mas no PC 1.2. O ponto de quebra, da curva sem contingências, está relacionado com os limites de produção de energia reactiva, ou seja, até este ponto de quebra todos os limites de produção de energia reactiva já tinham sido atingidos (ver secção 5.2.1). Esta análise continua correcta, e aplicável à nova curva, já que todos os restantes três geradores atingiram o seu limite de produção de energia reactiva antes do PC 1.1, como se pode ver na tabela 5.32.

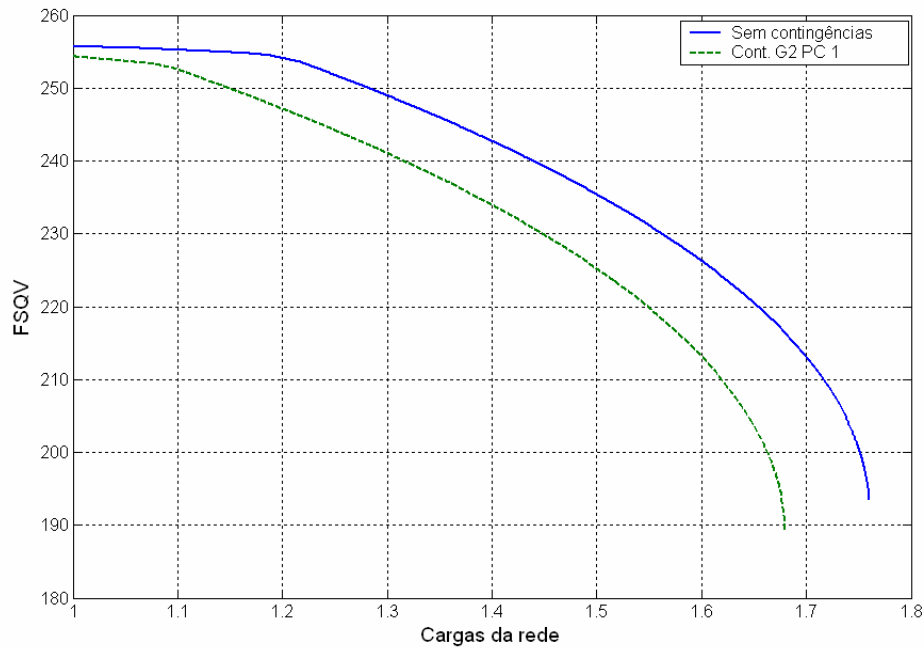


Figura 5.54 – Curvas FSQV referentes à rede de 14 barramentos (sem contingências ou com contingência no gerador 2 provocada no PC 1)

Tabela 5.32 – Limites de produção de energia reactiva dos geradores da rede de 14 barramentos para a contingência do gerador do barramento 2

Barramento		Limites de produção de energia reactiva		
Número	Tipo	Limite de Produção (pu) (1)	Ponto de carga onde ocorre	
			FC (N.º de ordem) (2)	FC (N.º de ordem) (3)
2	PV	0,5	67 (PC 1.067)	-
3	PV	0,4	165 (PC 1.165)	3 (PC 1.003)
6	PV	0,24	191 (PC 1.191)	79 (PC 1.079)
8	PV	0,24	219 (PC 1.219)	98 (PC 1.098)
(1) - Potência de base de 100 MVA (2) – sem contingências (3) – com contingência do gerador 2				

Outra diferença entre as duas curvas, e que é nítida na figura 5.54, é a maior inclinação do primeiro troço da curva, entre o PC 1 e o ponto de quebra. Sendo o aumento de cargas igual, com ou sem contingência, naturalmente se há uma redução de produção de reactiva

em cerca de um terço, devido à contingência do gerador do barramento 2, a inclinação aumenta devido a uma menor capacidade de produção de energia reactiva. Esta redução de produção de energia reactiva acentua-se no FC Nº 3 quando o limite de produção de reactiva é atingido no gerador do barramento 3.

O ponto de colapso da rede, com o incidente do gerador do barramento 2, é alcançado com um crescimento de cargas de 68,1 %, o que corresponde a uma redução do PMC de 4,55 % em relação ao PMC da rede sem incidentes.

Com o objectivo de realizar um estudo sobre o impacto das contingências no PMC de todos os produtores de energia reactiva foram realizadas simulações de contingências em todos os geradores ou *shunt* capacitivos.

Apresentam-se na tabela 5.33 os resultados das cinco simulações.

Tabela 5.33 – Redução do PMC devido a contingência de gerador ou *shunt* capacitivo da rede de 14 barramentos

Barramento do gerador/ <i>shunt</i> cap. com contingência		Limite de Produção (pu) (1)	PMC	
Número	Tipo		(%) (2)	Redução (%)
-	-	-	76,0	0
2	PV	0,50	68,0	4,55
3	PV	0,40	66,5	5,40
6	PV	0,24	65,5	5,97
8	PV	0,24	67,4	4,89
9	PQ (3)	0,19	72,3	2,10
(1) - Potência de base de 100 MVA				
(2) – Crescimento de cargas em relação às cargas base da rede de simulação				
(3) – Barramento PQ com um shunt capacitivo de 0,19 pu				

Como se pode ver na tabela 5.33, as reduções dos PMC devido às contingências de gerador são praticamente todas iguais, mas as potências de dois geradores, 6 e 8, são praticamente metade das potências dos outros dois geradores (ver tabela 5.32). A contingência do *shunt* capacitivo provoca um menor impacto, sensivelmente metade das quatro reduções do PMC anteriores, mas por outro lado, também tem praticamente metade da capacidade de produção de energia reactiva.

As curvas FSQV originadas pelas 5 contingências de geradores/*shunt* capacitivo da rede de 14 barramentos, ver figura 5.55, têm andamentos muito parecidos, confirmando a tese de que neste tipo de contingências são decisivos os PC onde os limites de produção de energia reactiva são atingidos. Uma análise aos pontos onde ocorrem todos os limites de produção de energia reactiva, e apresentados na tabela 5.34, confirmam a tese referida acima.

Tabela 5.34 – Limites de produção de energia reactiva dos geradores da rede de 14 barramentos para as contingências dos geradores/*shunt* capacitivo

Barramento		Limites de produção de energia reactiva		
Número	Tipo	Limite de Produção (pu) (1)	PC onde ocorre	
			FC (N.º de ordem) (2)	FC (N.º de ordem)
1 – Contingência no gerador do barramento 2				
2	PV	0,5	67 (PC 1.067)	-
3	PV	0,4	165 (PC 1.165)	3 (PC 1.003)
6	PV	0,24	191(PC 1.191)	79 (PC 1.079)
8	PV	0,24	219 (PC 1.219)	98 (PC 1.098)
2 – Contingência no gerador do barramento 3				
2	PV	0,5	67 (PC 1.067)	3 (PC 1.003)
3	PV	0,4	165 (PC 1.165)	-
6	PV	0,24	191(PC 1.191)	82 (PC 1.082)
8	PV	0,24	219 (PC 1.219)	95 (PC 1.095)
3 – Contingência no gerador do barramento 6				
2	PV	0,5	67 (PC 1.067)	8 (PC 1.008)
3	PV	0,4	165 (PC 1.165)	100 (PC 1.100)
6	PV	0,24	191(PC 1.191)	-
8	PV	0,24	219 (PC 1.219)	67 (PC 1.067)
4 – Contingência no gerador do barramento 8				
2	PV	0,5	67 (PC 1.067)	12 (PC 1.012)
3	PV	0,4	165 (PC 1.165)	99 (PC 1.099)
6	PV	0,24	191(PC 1.191)	55 (PC 1.055)
8	PV	0,24	219 (PC 1.219)	-
5 – Contingência no <i>shunt</i> capacitivo				
2	PV	0,5	67 (PC 1.067)	31 (PC 1.031)
3	PV	0,4	165 (PC 1.165)	109 (PC 1.109)
6	PV	0,24	191(PC 1.191)	39 (PC 1.039)
8	PV	0,24	219 (PC 1.219)	3 (PC 1.003)
(1) – Potência de base de 100 MVA				
(2) – sem contingências				

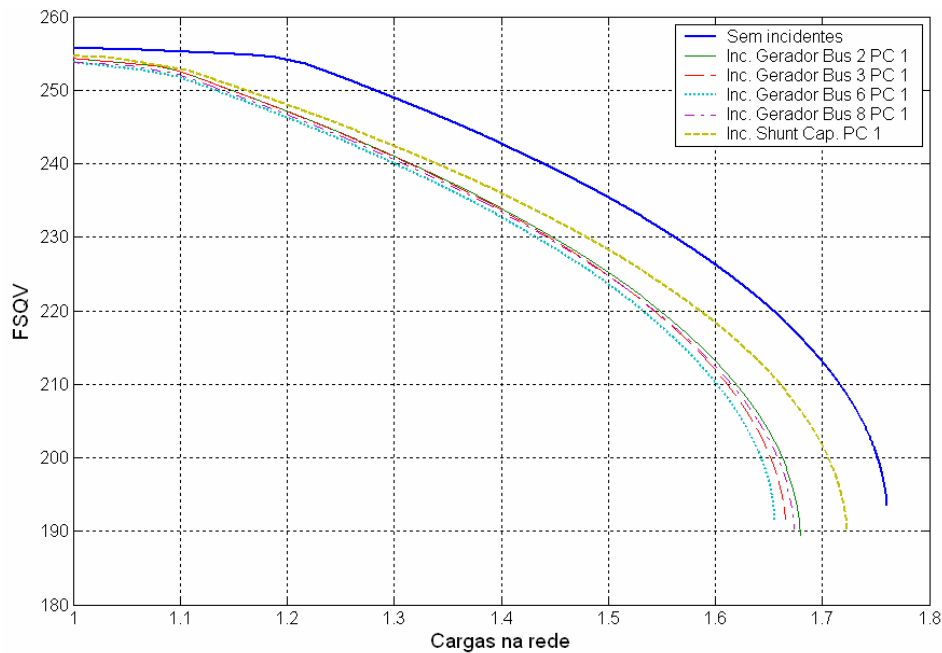


Figura 5.55 – Curvas FSQV referentes às contingências de gerador/shunt capacitivo da rede de 14 barramentos e provocadas no PC 1

Simulações com a rede de 57 barramentos

A primeira contingência foi provocada no gerador do barramento 12, simulando a saída de sincronismo do referido gerador, em consequência da actuação definitiva de protecções que por exemplo, poderá ser devido a uma sobre intensidade de corrente no estator.

Na figura 5.56 apresentam-se as curvas FSQV sem contingências e com contingência no gerador 12 provocada no PC 1.

Como se pode ver na figura 5.56, a contingência no gerador 12, no PC 1, provocou o aparecimento de uma nova curva FSQV, confirmando mais uma vez o comportamento das curvas FSQV perante uma contingência. O andamento da nova curva FSQV, é parecida com a curva sem contingências, mas há um forte abaixamento inicial e uma enorme compressão do primeiro troço, do PC1 até ao ponto de quebra. O segundo troço, do ponto de quebra até ao ponto de colapso é mais longo, sendo o valor final FSQV mais baixo (1160,5) em relação ao valor final sem contingências (1213,8).

Como vimos na secção 5.4.1, os pontos de quebra das curvas FSQV sem contingência estavam relacionados com os limites de produção de energia reactiva. Neste caso específico, o ponto de quebra coincide com o limite de produção de energia reactiva atingido

pelo gerador do barramento 8, ver tabela 5.35 e figura 5.56. Este gerador é o mais potente (2 pu), e o segundo gerador mais potente (1,55 pu) está avariado. No ponto de quebra, o gerador do barramento 2 ainda não atingiu o seu limite, mas dado que a sua potência é muito menor (0,5 pu), cerca de um quarto do mais potente, sozinho é incapaz de produzir a energia reactiva necessária para compensar a falta de aumento de produção dos outros geradores. Sem dúvida que, perante a análise realizada, fica explicada a forte compressão do primeiro troço da curva FSQV, que se deve à avaria do gerador com maior potência de produção de energia reactiva e à limitação de produção do 2º gerador mais potente, (ver tabela 5.35).

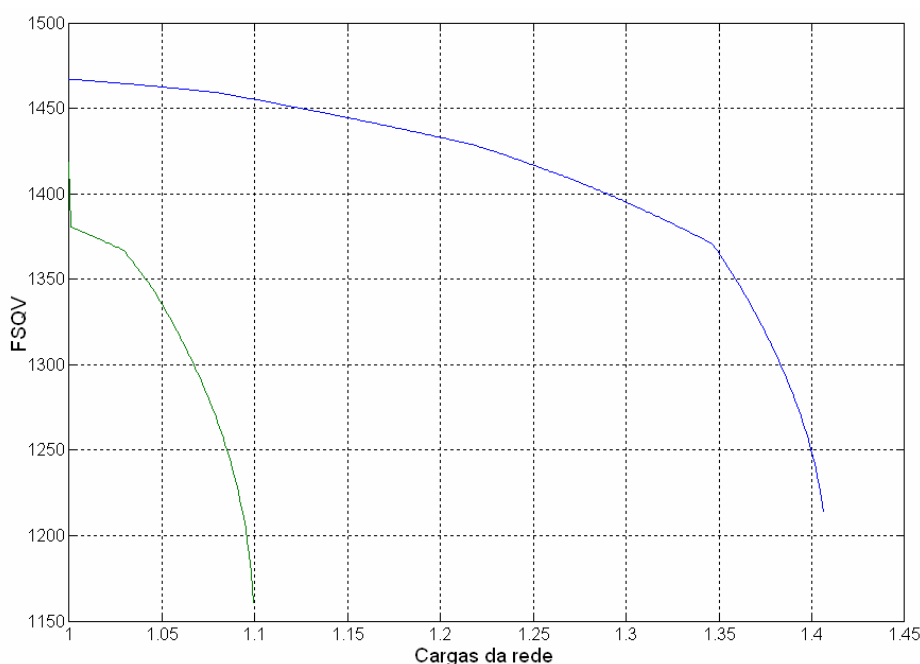


Figura 5.56 – Curvas FSQV referentes à rede de 57 barramentos (sem contingências ou com contingência no gerador 12 provocada no PC 1)

O ponto de colapso da rede, com o incidente do gerador do barramento 12, é atingido com um crescimento de cargas de 10 %, o que corresponde a uma redução do PMC de 75,43 % em relação ao PMC da rede sem incidentes.

As restantes simulações de contingências de geradores/*shunts* capacitivos também foram realizadas, apresentando-se na tabela 5.36 os resultados das reduções dos PMC.

Tabela 5.35 – PC onde ocorrem os limites de produção de energia reactiva dos geradores da rede de 57 barramentos para a contingência do gerador do barramento 12

Barramento		Limites de produção de energia reactiva		
Número	Tipo	Limite de Produção (pu) (1)	Ponto de carga onde ocorre	
			FC (N.º de ordem) (2)	FC (N.º de ordem) (3)
2	PV	0,5	281 (PC 1.280)	48 (PC 1.048)
3	PV	0,6	219 (PC 1.218)	2 (PC 1.002)
6	PV	0,25	229 (PC 1.228)	3 (PC 1.003)
8	PV	2	349 (PC 1.348)	32 (PC 1.032)
9	PV	0,09	47 (PC 1.046)	2 (PC 1.002)
12	PV	1,55	83 (PC 1.082)	-
Notas: (1) - Potência de base de 100 MVA (2) – sem contingências (3) – com contingência do gerador 12				

Como se pode ver na tabela 5.36, a redução do PMC, devido à contingência do gerador do barramento 8, é a maior, 99,75 %. As potências reactivas produzidas no primeiro FC, excedem os limites de produção dos geradores, com excepção do gerador do barramento 2, ver tabela 5.37. No segundo FC, as mesmas produções ao serem fixadas nos seus limites, provocam logo o colapso da rede. Na prática, caso ocorra esta contingência, a rede entra automaticamente em colapso.

As restantes contingências provocam diferentes reduções do PMC, mas não existe uma relação entre os limites de produção dos geradores e as respectivas reduções no PMC. Por exemplo, o gerador menos potente (0,09 pu) provoca uma redução no PMC de 1,23 %. O gerador do barramento 2 com um limite de produção de 0,5 pu, muito maior do que no gerador anterior, provoca a mesma redução de 1,23 %.

Em relação às reduções do PMC provocadas pelas contingências dos *shunts* capacitivos, a maior redução é de 1,72 % e não corresponde ao shunt capacitivo com maior potência instalada, mas sim, ao *shunt* capacitivo instalado no barramento 25.

A tabela 5.38 apresenta os PC onde ocorrem os limites de produção de energia reactiva dos geradores da rede de simulação de 57 barramentos para as contingências de geradores, com a excepção das contingências dos geradores referentes aos barramentos 8 e 12 já

analizados. O limite de produção do gerador do barramento 9 é o único que ocorre em PC superiores aos verificados nas simulações sem contingência.

Tabela 5.36 – Reduções dos PMC devido às contingências de gerador/shunt capacitivo da rede de 57 barramentos

Barramento do gerador com contingência		Limite de Produção (pu) (1) (2)	PMC	
Número	Tipo		Cargas da rede (3)	Redução (%)
-	-	-	40,7	0
2	PV	0,5	40,2	1,23
3	PV	0,6	36,9	9,34
6	PV	0,25	39,2	3,69
8	PV	2	0,1	99,75
9	PV	0,09	40,2	1,23
12	PV	1,55	10,0	75,43
18	PQ	0,1	40,3	0,98
25	PQ	0,059	40,0	1,72
53	PQ	0,063	40,4	0,74
18, 25 e 53	PQ	0,222	39,2	3,69
(1) – Energia reactiva (2) – Potência de base de 100 MVA (3) – Crescimento de cargas em relação às cargas base da rede de simulação				

Tabela 5.37 – Produções de energia reactiva no primeiro FC com a contingência provocada no PC 1 no gerador do barramento 8 da rede de 57 barramentos

Barramento		Produção de energia reactiva	
Número	Tipo	Limite (pu) (1)	Produção após o 1º FC (1)
2	PV	0,5	0,27
3	PV	0,6	0,83
6	PV	0,25	1,04
9	PV	0,09	1,48
12	PV	1,55	2,07
Notas: (1) - Potência de base de 100 MVA			

Tabela 5.38 – PC onde ocorrem os limites de produção de energia reactiva dos geradores da rede de 57 barramentos para as contingências de geradores (excepção geradores barramentos 8 e 12)

Barramento		Limites de produção de energia reactiva		
Número	Tipo	Limite de Produção (pu) (1)	PC onde ocorre	
			FC (N.º de ordem) (2)	FC (N.º de ordem) (3)
1 – Contingência no gerador do barramento 2				
2	PV	0,5	281 (PC 1.280)	-
3	PV	0,6	219 (PC 1.218)	202 (PC 1.202)
6	PV	0,25	229 (PC 1.228)	219 (PC 1.219)
8	PV	2	349 (PC 1.348)	342 (PC 1.342)
9	PV	0,09	47 (PC 1.046)	48 (PC 1.048)
12	PV	1,55	83 (PC 1.082)	83 (PC 1.083)
2 – Contingência no gerador do barramento 3				
2	PV	0,5	281 (PC 1.280)	174 (PC 1.174)
3	PV	0,6	219 (PC 1.218)	-
6	PV	0,25	229 (PC 1.228)	127 (PC 1.127)
8	PV	2	349 (PC 1.348)	301 (PC 1.301)
9	PV	0,09	47 (PC 1.046)	37 (PC 1.037)
12	PV	1,55	83 (PC 1.082)	69 (PC 1.069)
3 – Contingência no gerador do barramento 6				
2	PV	0,5	281 (PC 1.280)	269 (PC 1.269)
3	PV	0,6	219 (PC 1.218)	197 (PC 1.197)
6	PV	0,25	229 (PC 1.228)	-
8	PV	2	349 (PC 1.348)	324 (PC 1.324)
9	PV	0,09	47 (PC 1.046)	47 (PC 1.047)
12	PV	1,55	83 (PC 1.082)	82 (PC 1.082)
4 – Contingência no gerador do barramento 9				
2	PV	0,5	281 (PC 1.280)	279 (PC 1.048)
3	PV	0,6	219 (PC 1.218)	215 (PC 1.003)
6	PV	0,25	229 (PC 1.228)	227 (PC 1.032)
8	PV	2	349 (PC 1.348)	340 (PC 1.032)
9	PV	0,09	47 (PC 1.046)	-
12	PV	1,55	83 (PC 1.082)	75 (PC 1.002)
Notas: (1) - Potência de base de 100 MVA (2) – sem contingências (3) – com contingência do gerador				

Na figura 5.57 apresentam-se as curvas FSQV referentes às simulações sem contingências ou com contingência de gerador no PC1, com exceção do gerador 8 devido às razões já referidas anteriormente.

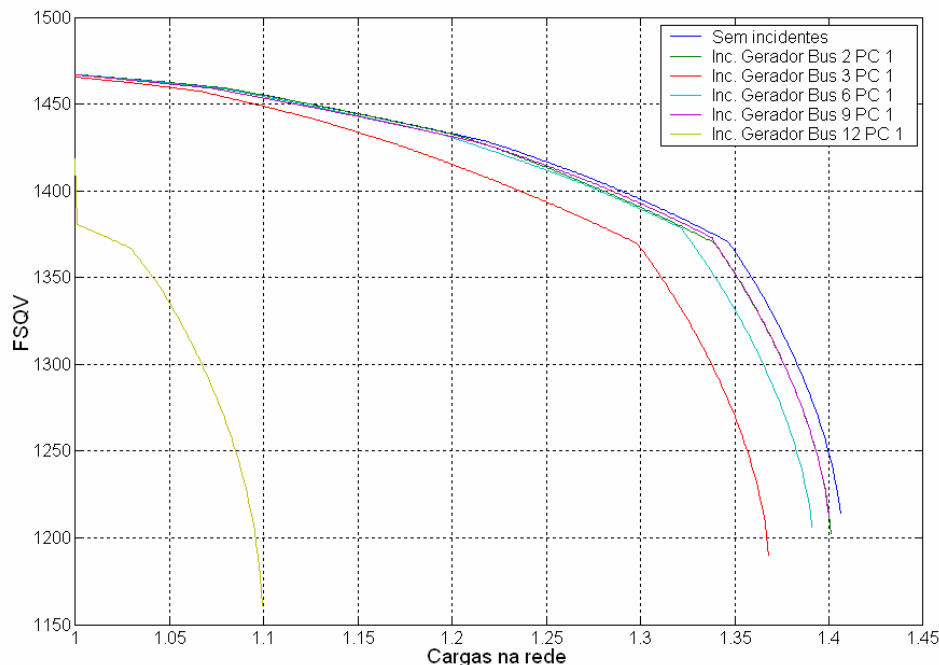


Figura 5.57 – Curvas FSQV referentes às simulações sem contingências ou com contingência de gerador provocada no PC1 (exceção do gerador 8)

Analisando a figura 5.52 constata-se que em todas as curvas FSQV, ainda não analisadas anteriormente, que correspondem aos geradores com menores limites de produção de energia reactiva, as diferenças em relação à curva FSQV sem contingências é menor, ou seja, há uma menor compressão do primeiro troço. O ponto de quebra continua a coincidir com o PC onde é atingido o limite de produção do gerador do barramento 8.

Na figura 5.58 apresentam-se as curvas FSQV referentes às simulações das contingências dos *shunts* capacitivos, da rede de 57 barramentos, provocados no PC 1. O andamento das curvas FSQV obtidas com a simulação das contingências dos *shunts* capacitivos, um a um, ou todos em simultâneo, é muito parecido com a curva sem contingências. Mantêm-se em todas a característica que é comum a curvas FSQV, anteriormente analisadas e referentes a contingências de geradores (ver figura 5.57), da maior ou menor compressão do primeiro troço.

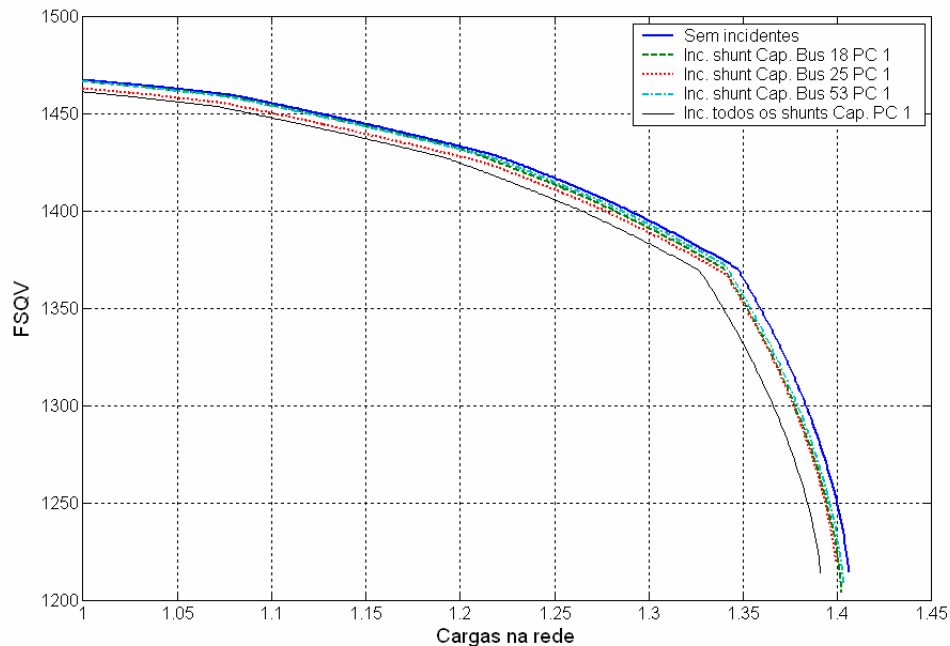


Figura 5.58 – Curvas FSQV referentes às simulações sem contingências ou com contingência nos shunts capacitivos provocada no PC1 (rede de testes de 57 barramentos)

5.5.2.1.2 – Estudo de contingências de geradores de 1º nível provocadas no PC arbitrário

Simulações com a rede de 14 barramentos

As contingências foram provocadas no gerador do barramento 2, nos PC 1.1, 1.68 e 1.7, respectivamente na fase inicial, antes e após o colapso da rede com contingência no PC 1 que ocorre no PC 1.681.

Nas figuras 5.59 a 5.61 apresentam-se as curvas FSQV referentes às três contingências do gerador do barramento 2, nos PC já referidos, da rede de simulação de 14 barramentos.

Na análise efectuada às figuras 5.59 a 5.61 mais uma vez se reconhece o comportamento padrão do método FSQV. Mantêm-se assim coerente com o comportamento anteriormente encontrado e analisado na secção 5.5.1.1.2, referente às contingências de linha provocadas em situações semelhantes.

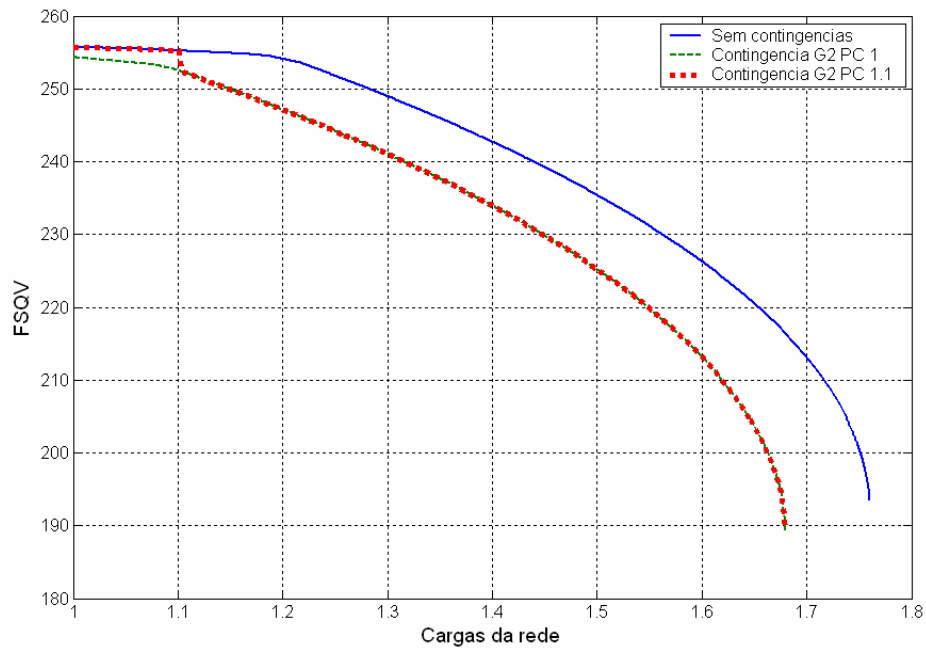


Figura 5.59 – Curva FSQV sem contingência e com contingência no gerador 2 provocada nos PC 1 e 1.1 (rede de 14 barramentos)

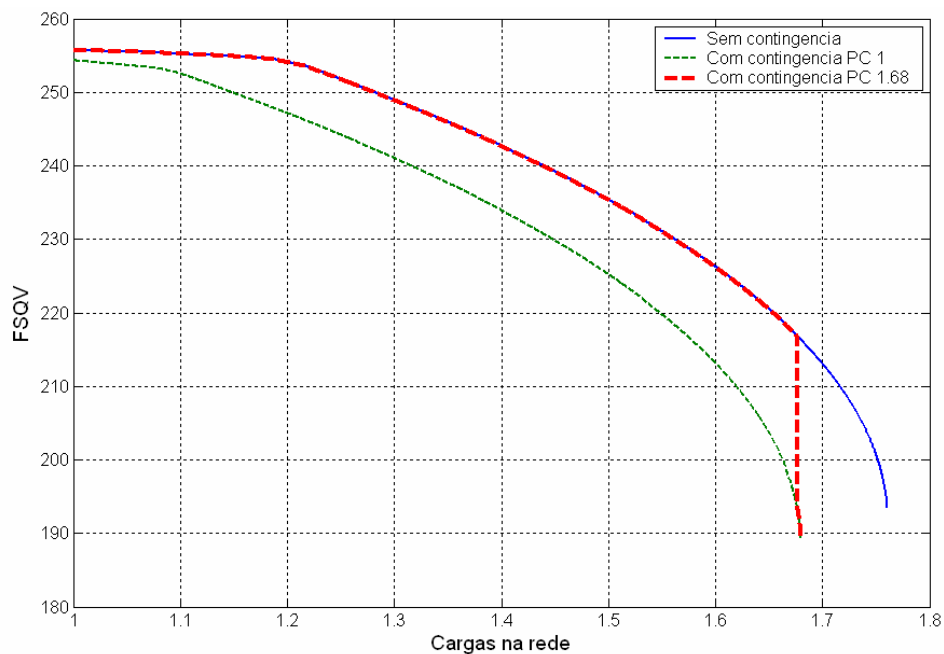


Figura 5.60 – Curva FSQV sem contingência e com contingência no gerador 2 provocada nos PC 1 e 1.68 (rede de 14 barramentos)

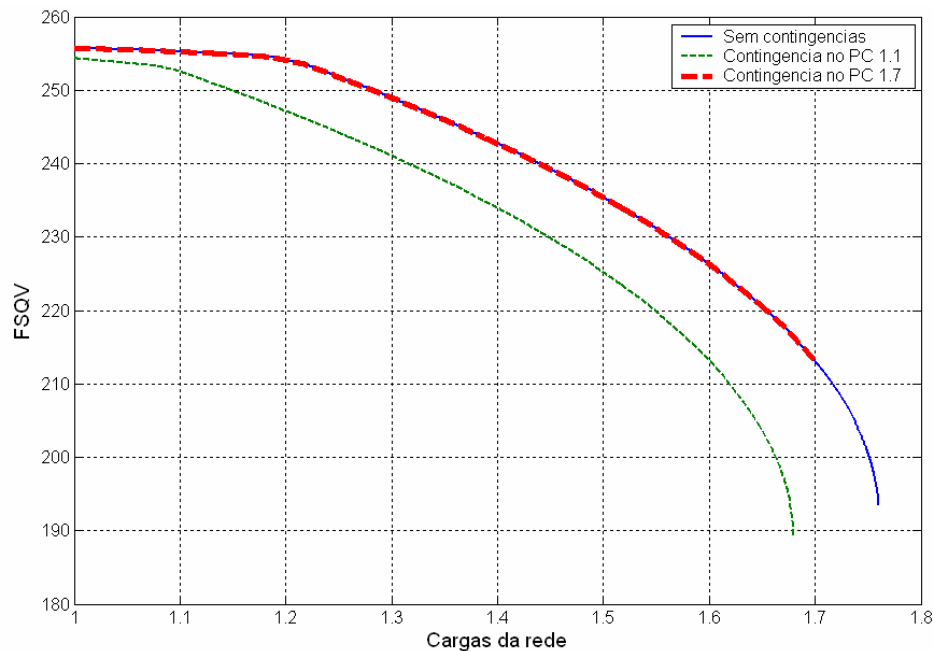


Figura 5.61 – Curva FSQV sem contingência e com contingência no gerador 2 provocada nos PC 1 e 1.7 (rede de 14 barramentos)

Simulações com a rede de 57 barramentos

Usando a mesma metodologia utilizada para a rede de 14 barramentos, foram realizadas simulações com o objectivo de analisar as contingências de geradores criadas num ponto de funcionamento arbitrário.

Para as simulações a realizar foi seleccionado o gerador do barramento 3. As contingências foram provocadas nos PC 1.2 e 1.38, que correspondem respectivamente a pontos de funcionamento antes e depois do colapso da rede com contingência do mesmo gerador provocada no PC 1.

Nas figuras 5.62 e 5.63 apresentam-se as curvas referentes às duas contingências criadas no gerador do barramento 3 da rede de testes de 57 barramentos.

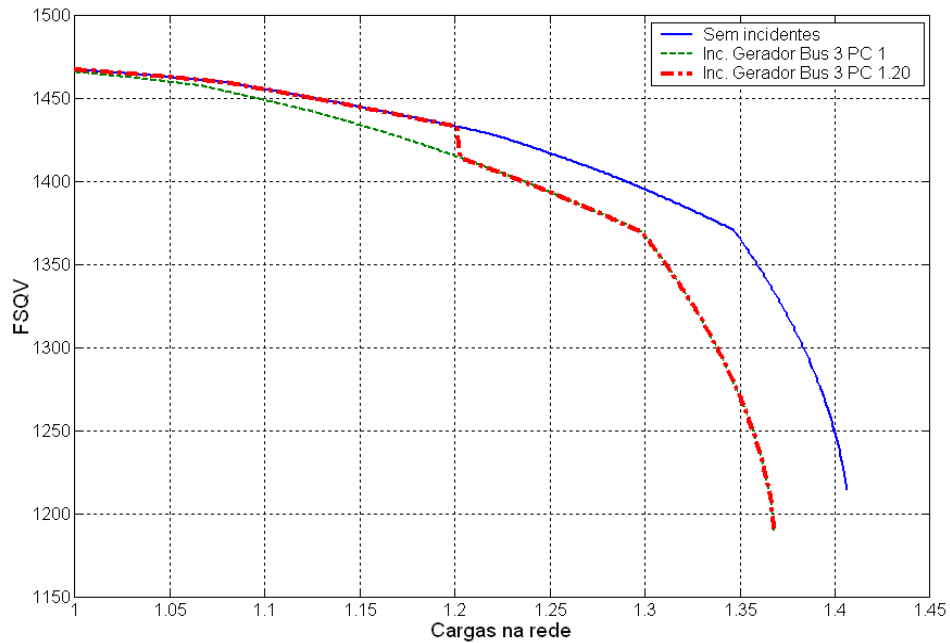


Figura 5.62 – Curva FSQV sem contingência e com contingência do gerador 3 provocada nos PC 1 e 1.2 (rede de 57 barramentos)

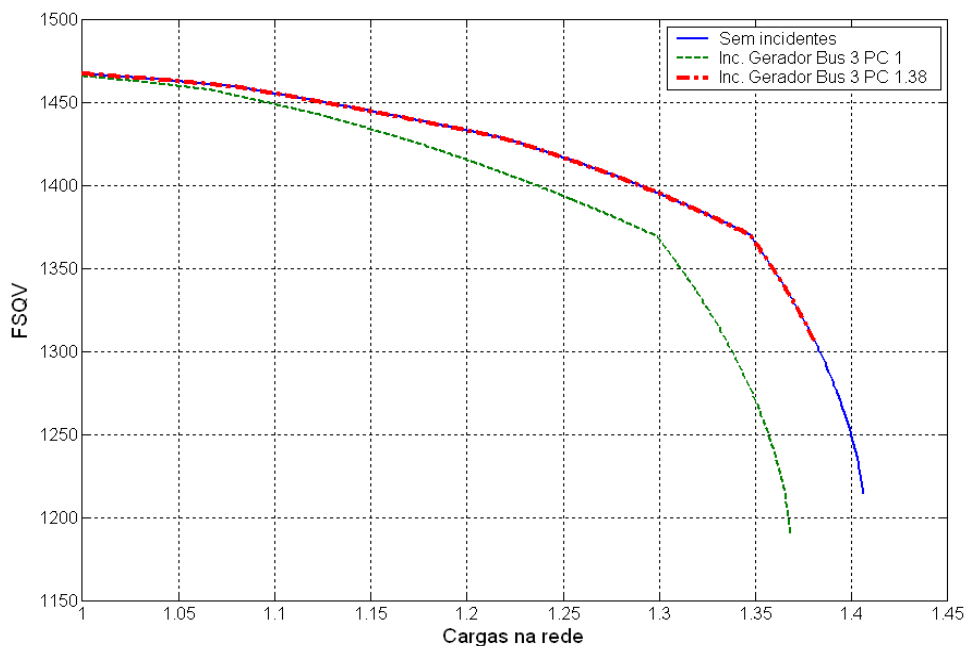


Figura 5.63 – Curva FSQV sem contingência e com contingência do gerador 3 provocada nos PC 1 e 1.38 (rede de 57 barramentos)

Como se pode constatar nas figuras 5.62 e 5.63, o comportamento do método FSQV, aplicado à análise das contingências de gerador da rede de 57 barramentos e para PC arbitrários, continua a ser coerente com os resultados já obtidos anteriormente.

5.5.2.2 – Estudo de contingências de geradores de 2º nível

O estudo do impacto na estabilidade de tensão de contingências de geradores de 2º nível é muito importante. Quando ocorre uma contingência num gerador, obrigando à sua saída de sincronismo, e a sua resolução se prolonga no tempo, a probabilidade de ocorrer uma segunda contingência aumenta. Estas situações extremas têm uma probabilidade muito baixa, mas que podem ocorrer, devido à conjugação de factores muito adversos. O *blackout* estudado no capítulo 3, é um exemplo dessas situações extremas que ocorrem com uma frequência muito baixa, mas quando ocorrem podem provocar o colapso total ou parcial dos SEE. Para as evitar é necessário a existência de ferramentas informáticas que simulem contingências de múltiplo nível e permitiam fornecer medidas correctivas. Após a ocorrência de uma contingência que provoca perda de produção de energia reactiva é necessário simular as contingências possíveis de 2º nível, para encontrar a contingência mais penalizante que pode ocorrer.

As contingências de 2º nível correspondem ao aparecimento em simultâneo ou desfasadas no tempo de duas contingências de geradores.

Simulações com a rede de 14 barramentos

Utilizando a mesma metodologia usada para as contingências de 2º nível em linhas, ver secção 5.5.1.2, foram simuladas contingências nos geradores 2 e 3. O algoritmo das contingências de 2º nível de linhas foi adaptado para as contingências de geradores.

Na figura 5.64 apresentam-se as curvas FSQV referentes: à rede sem incidentes; com uma contingência em cada um dos geradores 2 e 3 provocados no PC 1; com dois incidentes provocados em simultâneo nos dois geradores no PC1; e por último no PC 1.3 e PC 1.5 respectivamente para os geradores 2 e 3.

Como se pode ver na figura 5.64, a simulação de duas contingências de geradores, em simultâneo e no PC 1, provocou o aparecimento de uma nova curva FSQV. Este comportamento do método FSQV é igual ao já verificado com a simulação de contingências de duas linhas em iguais circunstâncias, (ver secção 5.5.1.2).

As contingências do gerador 2 no PC 1.3 e do gerador 3 no PC 1.5 provocam um comportamento semelhante das curvas FSQV, para o mesmo tipo de contingência, verificado com duas linhas e já analisado exaustivamente na secção 5.5.1.2.

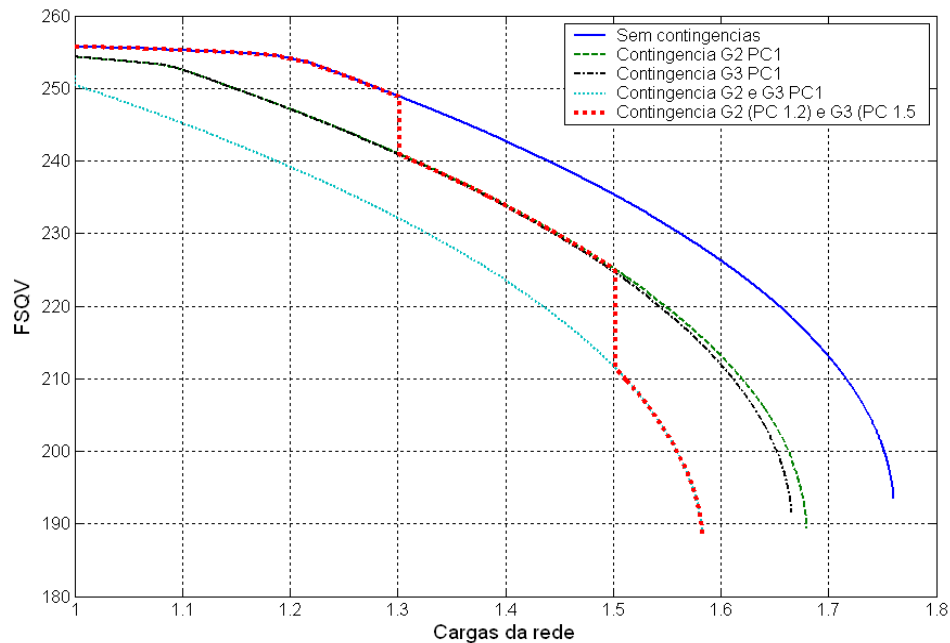


Figura 5.64 – Curvas FSQV referente às contingências provocadas na de 14 barramentos: sem conting., contig. G2 PC 1, contig. G3 PC1, contig. em simultâneo G2 e G3 PC1 e contig. G2 (PC 1.2) e G3 (PC1.5)

A redução do PMC, devido às contingências dos geradores 2 e 3 da rede de simulações de 14 barramentos, é apresentada na tabela 5.39. Nesta caso concreto, a soma das reduções individuais (9,95 %) é praticamente igual ao valor da redução da PMC provocada pelas contingências dos dois geradores (10,06). Estas duas contingências são as mais penalizantes, dado que envolvem os geradores com maior capacidade de produção de energia reactiva.

Tabela 5.39 – Redução do PMC devido à contingência de dois geradores da rede de 14 barramentos

Barramento do gerador com contingência		Limite de Produção (pu) (1)	PMC	
Número	Tipo		(%) (2)	Redução (%)
-	-	-	76,0	0
2	PV	0,50	68,0	4,55
3	PV	0,40	66,5	5,40
2 e 3	PV	0,90	58,3	10,06
(1) - Potência de base de 100 MVA				
(2) – Crescimento de cargas em relação às cargas base da rede de simulação				

Simulações com a rede de 57 barramentos do IEEE

Como as contingências que provocam maior redução do PMC são as dos geradores 3 e 12, ver tabela 5.36, excluindo a do gerador 8 por provocar automaticamente o colapso da rede pelas razões já referidas na secção 5.5.2.1.1, faz sentido envolver estes dois geradores neste tipo de contingências. Estas duas contingências foram simuladas em primeiro lugar, em simultâneo e no PC1, e em segundo lugar em PC diferentes.

Na figura 5.65 são apresentadas as curvas FSQV referentes: à rede sem incidentes; com contingências individuais nos geradores 12 e 3 provocados no PC1; com dois incidentes provocados em simultâneo nos mesmos dois geradores no PC1; e por último no PC 1.1 e PC 1.2 respectivamente nos geradores 12 e 3.

A simulação de duas contingências de geradores da rede de testes de 57 barramentos, em simultâneo e no PC1, provocou o aparecimento de uma nova curva FSQV, confirmando o comportamento padrão do método FSQV para todo o tipo de contingências.

A contingência do gerador 12 no PC 1.1 e da contingência do gerador 3 no PC 1.2, confirma um comportamento que também é padrão do método FSQV, para o mesmo tipo de contingências.

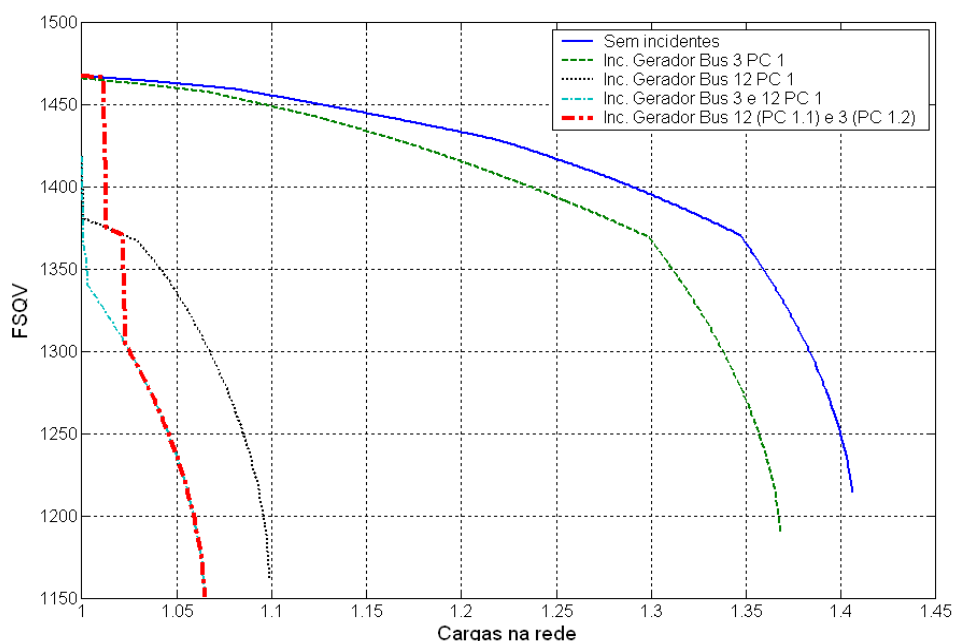


Figura 5.65 – Curvas FSQV referente à rede de 57 barramentos: sem conting., contig. G3 PC 1, contig. G12 PC1, contig. em simultaneo G3 e G12 PC1 e contig. G12 (PC 1.1) e G3 (PC1.2)

A redução do PMC devido às contingências referidas é 83,73 %, ver tabela 5.40. A soma das reduções individuais (84,77) é praticamente igual ao valor da redução da PMC provocada pelas contingências dos dois geradores (83,78).

Tabela 5.40 – Reduções dos PMC devido às contingências de gerador de 2º nível da rede de 57 barramentos

Barramento do gerador com contingência		Limite de Produção (pu) (1) (2)	PMC	
Número	Tipo		(%) (3)	Redução (%)
-	-	-	40,7	
3	PV	0,5	36,9	9,34
12	PV	0,6	10,0	75,43
3 e 12	PV	1,1	6,6	83,78
(1) – Energia reactiva (2) – Potência de base de 100 MVA (3) – Crescimento de cargas em relação às cargas base da rede de simulação				

5.6 – PLANEAMENTO DA EXPANSÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA REACTIVA UTILIZANDO O MÉTODO FSQV

O planeamento da expansão da produção de energia eléctrica deve ser uma preocupação constante, dos gestores dos SEE, para continuamente melhorar a sua segurança. As ferramentas informáticas são muito importantes para a detecção dos pontos críticos, onde a maior produção de energia reactiva, permitirá uma maior segurança e um aumento do PMC do SEE.

Uma análise da tabela 5.4 permite detectar os geradores críticos da rede de 57 barramentos, tendo como critério de análise o PC onde o seu limite de produção de energia reactiva é atingido. Os dois primeiros geradores a atingir o seu limite de produção são os geradores do barramento 9, no FC número 47, e o do barramento 12 no FC número 83. Estes dois geradores têm como limite, respectivamente 0,09 pu e 1,55 pu. Estes dois geradores ao atingirem muito cedo o seu limite de produção dão uma indicação clara que

estão localizados numa zona que necessita de maior produção de energia reactiva. Se o segundo gerador é o segundo mais potente, o primeiro é o gerador menos potente.

Como exemplo de aplicação do novo método FSQV, nos estudos da expansão da produção de energia reactiva, foi ser simulado o aumento de potência reactiva do gerador do barramento 9 de 0,09 pu para 1 pu.

A tabela 5.41 apresenta os novos limites de produção de energia reactiva com a alteração referida do gerador 9.

Tabela 5.41 – Limites de produção de energia reactiva para a rede de testes de 57 barramentos com a alteração do limite de produção de energia reactiva do gerador 9

Barramento		Limites de produção de energia reactiva		
Número	Tipo	Limite de produção (pu)	Ponto de carga onde ocorre	
			FC (N.º ordem) (b)	FC (N.º ordem) (c)
2	PV	0,5	281	299
3	PV	0,6	219	243
6	PV	0,25	229	248
8	PV	2	349	432
9	PV	0,09 (b) 1 (c)	47	305
12	PV	1,55	83	89
(1) - potência de base de 100 MVA				

Com o aumento da potência do gerador 9, o novo limite é atingido no FC Nº 305. Em consequência o crescimento de cargas percentual, até ao colapso, passou de 40,7 para 46,1 a que corresponde um aumento do PMC de 13,27 %, ver tabela 5.42. Outra consequência interessante de analisar é o facto de todos os limites dos outros geradores serem agora atingidos mais tarde. É de realçar, e com especial importância, o ponto onde o gerador 8 atinge o seu limite, por ser o mais potente e a partir desse ponto com um pequeno incremento de carga é atingido o colapso da rede.

Como se pode ver na figura 5.66, a nova curva FSQV alongou-se, no seu primeiro troço, e reduziu-se no seu segundo troço. O ponto de quebra, que coincide com o ponto onde o limite de produção de energia reactiva do gerador 8 é atingido, é agora no PC 1.432 e antes era no PC 1.349. A partir do mesmo ponto de quebra o colapso era atingido com um crescimento de cargas de 5,8 %, mas agora bastam 2,9 % para ser atingido.

Tabela 5.42 – Aumento do PMC com a alteração do limite de produção de energia reactiva do gerador 9 da rede de testes de 57 barramentos

Barramento do gerador		Limite de Produção (pu) (1)	PMC	
Número	Tipo		(%) (2)	Aumento (%) (3)
9	PV	0,09	40,7	-
9	PV	1	46,1	13,27

(1) - Potência de base de 100 MVA
 (2) - Crescimento de cargas em relação às cargas base da rede de simulação
 (3) - Em relação ao limite de produção do gerador 9 de 0,09 pu

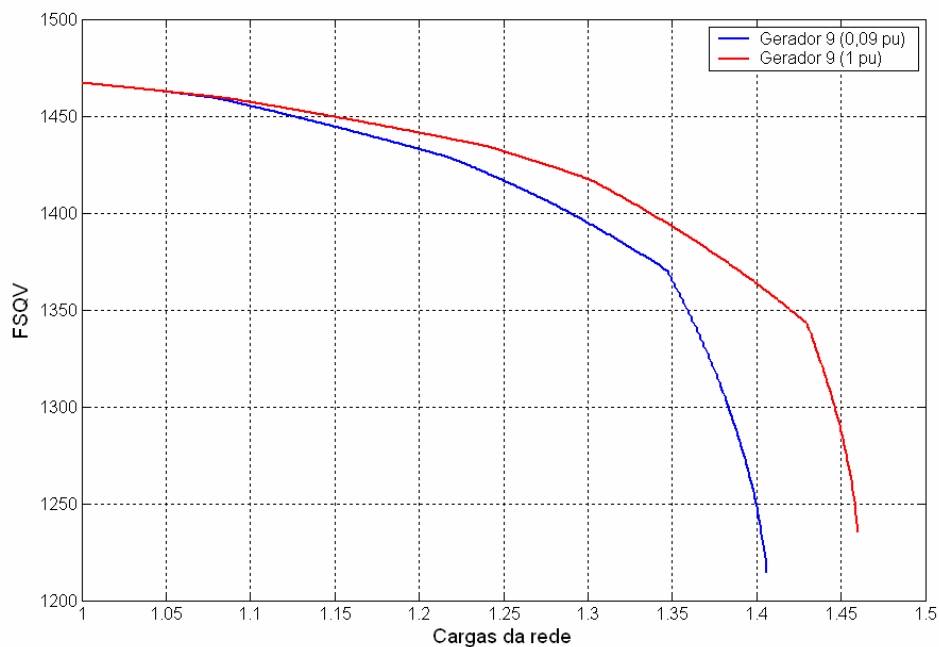


Figura 5.66 – Curvas FSQV referente à rede de 57 barramentos com o limite de produção de energia reactiva do gerador 9 de 0,09 pu e 2 pu

Com este estudo de planeamento, não se pretendeu ser exaustivo, mas sim provar da sua aplicabilidade, e interesse, a estudos de planeamento.

5.7 – O NOVO ÍNDICE DE DISTÂNCIA AO COLAPSO NIVCP

Os índices de distância ao ponto de colapso de tensão são uma importante ferramenta de monitorização dos sistemas eléctricos, permitindo acompanhar a evolução da estabilidade de tensão dos mesmos sistemas. Estes índices, também são muito importantes para a realização de estudos de estabilidade de tensão com contingências. Neste caso concreto, é importante encontrar a pior contingência em termos de estabilidade de tensão, de vários níveis, pois como vimos no capítulo 3, em casos extremos, poderão acontecer contingências em avalanche. Com base nos estudos de estabilidade de tensão é possível definir as acções correctivas necessárias, para cada caso, e preparar as equipas técnicas para a sua implementação, caso ocorram.

Nos estudos de planeamento, os estudos com base nos índices de distância ao colapso são igualmente muito importantes. Estes estudos têm como objectivo o planeamento atempado do reforço dos meios de produção de energia reactiva, pois como vimos no capítulo 2, são muito importantes para fazer face a situações de estabilidade de tensão. Permite de uma forma contínua, o controlo da tensão nos sistemas eléctricos, mantendo as tensões dentro dos intervalos regulamentares.

As simulações realizadas com a rede de 57 barramentos, com os cenários B1 a B11, permitiram detectar que o último valor FSQV, antes do colapso, tinha um erro zero. Mesmo aumentando 200 % as cargas dos barramentos com cargas mais pesadas ou dos seis barramentos que entram primeiro em colapso, e por isso críticos em termos de tensões, o erro do referido FSQV era zero. Com base nesta constatação foi possível definir um novo método de detecção do ponto de colapso para a rede de 57 barramentos.

A detecção do ponto do colapso de tensão permite calcular a distância, do ponto de funcionamento actual do sistema eléctrico ao mesmo ponto de colapso, medida em capacidade de aumento de carga. Nas simulações realizadas, a capacidade de aumento de carga foi definida para a carga activa e reactiva, mantendo-se a relação entre as duas cargas constante e igual à relação das cargas base.

Foi definido um novo índice de distância ao ponto de colapso de tensão, que foi chamado pelo acrónimo NIVCP - *New Index to Voltage Collapse Point*. O valor inicial, deste novo índice de distância ao colapso, corresponde à situação base da rede e o valor final corresponde ao PMC, calculado como já vimos anteriormente para o ponto de colapso. O novo índice é portanto uma percentagem do PMC baseando-se nas curvas FSQV.

A figura 5.67 apresenta a curva do índice NIVCP para a rede de 57 barramentos.

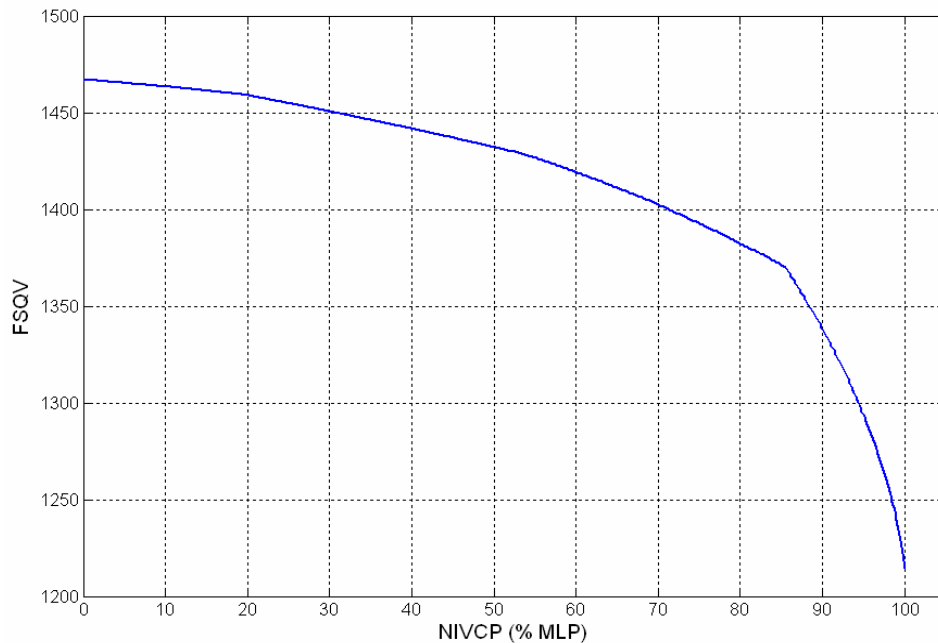


Figura 5.67 – Índice NIVCP para a rede de 57 barramentos

Na figura 5.67, o valor 100 % do índice NIVCP corresponde a um aumento de cargas de 40,7 % das cargas base, ver secção 5.2.2. Com o valor do FSQV, referente ao ponto de funcionamento actual da rede de 57 barramentos, é possível calcular facilmente a distância a que encontra do ponto do colapso.

O índice de distância ao colapso NIVCP ao ser definido como uma percentagem do PMC torna possível a utilização dos estudos efectuados de redução do PMC, apresentados anteriormente.

Na figura 5.68 apresenta-se as reduções no índice NIVCP provocadas por contingências de linha de 1º nível na rede de 57 barramentos. Esta figura é uma repetição da figura 5.34, tendo-se unicamente alterado o título do eixo das ordenadas.

As tabelas C13 e C14 e 5.30, com os resultados considerados mais importantes, da redução do PMC devido a contingência de linha de 1º nível na rede de 57 barramentos, são também iguais para a análise da redução do índice NIVCP, com as referidas contingências. De igual forma todas as tabelas de reduções do PMC devido a contingências de linhas, transformadores, geradores e shunt capacitivos, de 1º nível ou superior, é possível serem convertidos, pelas razões apontadas anteriormente.

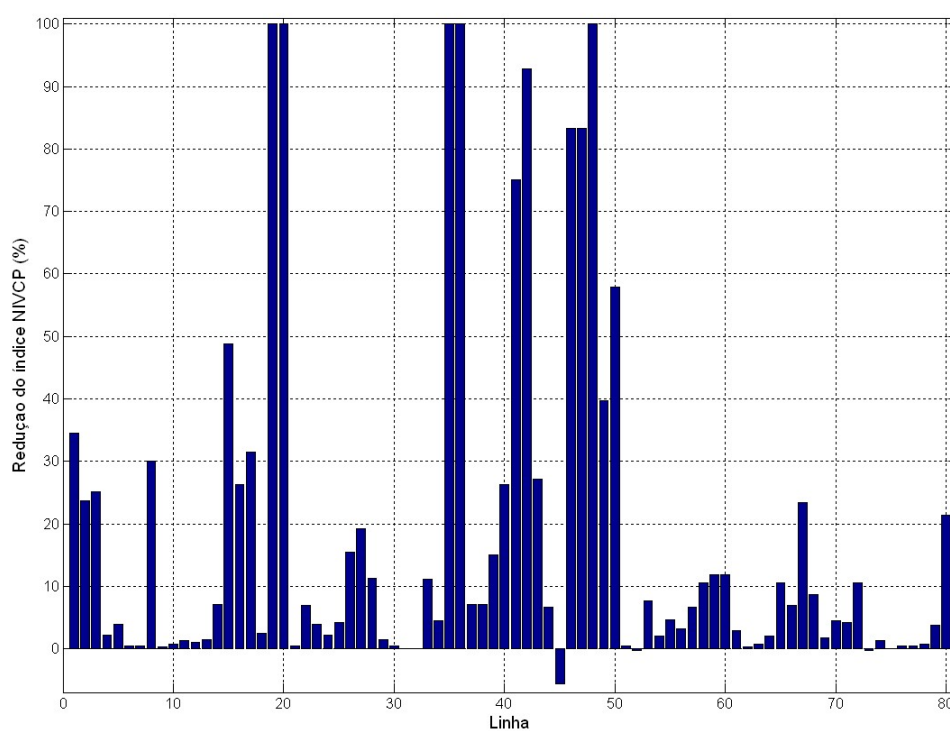


Figura 5.68 – Redução do índice NIVCP provocada por contingências de linha de 1º nível da rede de 57 barramentos

5.8 – CONCLUSÕES

A utilização de um FC contínuo como método para a obtenção da distância ao colapso revelou-se simples e rápido, face aos outros dois métodos existentes, da continuação e da continuação predictor-corrector. O método usado só foi viável devido ao aumento da capacidade de processamento dos PC, e caso fosse usado um PC topo de gama, os tempos necessários nas simulações seriam ainda menores.

O desenvolvimento do novo método FSQV, de análise de instabilidade de sistemas eléctricos de energia, e a aplicação a duas redes de testes do IEEE, permite extrair o segundo conjunto de conclusões:

1. cada rede de testes tem valores FSQV diferentes, ao longo do processo de carregamento das redes até ao colapso. O valor FSQV ao ser um somatório de $\delta Q/\delta V$ depende necessariamente do número de barramentos. Para a rede de testes de 14 barramentos, os valores iniciais são 255.72 e 1467.1, sendo os valores finais 193.36 e 1213.8 respectivamente para as redes de 14 e 57 barramentos. Para redes com maiores dimensões é de prever que estes valores subam;
2. cada rede de testes tem uma curva FSQV característica. Foi possível provar que o andamento destas curvas dependente dos limites de produção de energia reactiva dos geradores síncronos ou de outras fontes de energia reactiva. Cada limite alcançado criou um ponto de quebra nas referidas curvas. Estes pontos característicos são mais perceptíveis quando os geradores têm limites mais altos;
3. o valor FSQV, do último FC antes do colapso não se altera, ou tem um erro desprezável, perante vários cenários de cargas. Nos cenários criados definiram-se dois grupos, os barramentos com cargas reactivas mais pesadas e os barramentos mais críticos em termos de colapso de tensão. Pretendeu-se assim criar os dois grupos de cargas mais penalizantes para o estudo que se pretendia realizar. O crescimento destes dois grupos chegou a ser triplo dos restantes barramentos. Os resultados com a rede de testes de 14 barramentos eram promissores, tendo um erro desprezável. Os resultados das simulações com a rede de testes de 57 barramentos são totalmente concludentes ao terem um erro nulo;
4. os resultados do ponto 3, especialmente os referentes à rede de 57 barramentos permitem propor o novo método FSQV, como novo método de detecção do ponto de colapso, e também definir um novo índice ao colapso de tensão;

-
5. o novo método de detecção do colapso proposto demonstrou ser extremamente robusto ao possibilitar a variação das cargas base de um ou dois barramentos em simultâneo. Para um desvio máximo de 2% da grandeza FSQ foi possível aumentar a carga de um único barramento de 18 a 1404 % e de 10 a 1579 % para a combinação de dois barramentos;
 6. provou-se ser possível a aplicação do novo método FSQV no estudo de contingências de linhas, transformadores, geradores e baterias de condensadores, com um ou vários níveis. Foi possível analisar o impacto no PMC dos vários tipos de contingências. Estes estudos são muito importantes na análise de estabilidade de redes eléctricas;
 7. a aplicabilidade do novo método FSQV no estudo de planeamento da expansão da produção de energia reactiva é outra interessante aplicação do novo método de estudos de estabilidade;
 8. com base no novo método FSQV de detecção do colapso, foi definido um novo índice global de distância ao colapso NIVCP - *New Index to Voltage Collapse Point*, para aplicação nos estudos de estabilidade;
 9. os resultados obtidos com a rede de testes de 57 barramentos, face aos resultados com a rede de testes de 14 barramentos, levam à conclusão que o novo método é mais estável para redes com maior dimensão.

Capítulo 6

RESULTADOS NUMÉRICOS DA APLICAÇÃO DE REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS

CAPÍTULO 6

RESULTADOS NUMÉRICOS DA APLICAÇÃO DE REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS

O presente capítulo apresenta os resultados numéricos da aplicação de RNA ao cálculo da distância ao colapso de tensão de SEE. A apresentação de resultados é acompanhada de uma análise crítica, que foi sempre necessária para realizar balanços parciais do estado da investigação e indispensáveis na reorientação da mesma investigação.

6.1 – Motivação para a aplicação de uma RNA no cálculo da distância ao colapso de SEE

O FC contínuo é o método mais utilizado para o cálculo da distância ao colapso das redes eléctricas. Para redes muito extensas o método clássico tem o inconveniente de ser muito demorado. Se para certas necessidades não é crítico, como por exemplo no planeamento, noutras situações, como a exploração, em que há a necessidade de se saber, em tempo real, do estado da rede numa contínua monitorização do SEE, as soluções demoradas não são as mais adequadas. Nasce então uma janela de oportunidade para a pesquisa de novos métodos para ultrapassar as limitações apontadas, ou seja, por um lado terão de ser rápidos, e por outro lado, os seus resultados terão de ser fiáveis para permitirem um bom apoio à decisão em tempo real.

As redes neuronais, cujas bases teóricas foram expostas no capítulo 4, foram escolhidas para investigação de um método expedito de cálculo da distância ao colapso.

6.2 – Aplicação de RNA no cálculo da distância ao colapso de SEE

A definição da informação para a aprendizagem de uma RNA é o primeiro passo a realizar. A informação a escolher deverá caracterizar o SEE em cada ponto de funcionamento. Cada ponto de funcionamento pode ser caracterizado pelas cargas activas e reactivas dos barramentos e a correspondente distância ao colapso. As entradas da rede neuronal irão ser unicamente as potências reactivas nos barramentos e a saída irá ser a distância ao colapso. Como os aumentos de carga são iguais, para a potência activa e reactiva, é possível prescindir da utilização da potência activa para entradas da rede neuronal, reduzindo assim as entradas para metade.

Todas as simulações irão utilizar a rede de 57 barramentos do IEEE, e por isso, qualquer referência à rede de testes será sempre referido a esta rede. Dos 57 barramentos que constitui esta rede de testes, só 42 é que têm cargas, os restantes 15 barramentos ou correspondem a transformadores ou são barramentos sem cargas, ver tabela A3. Sendo no modelo usado para a realização de FC, o barramento de referência excluído, o número de entradas passa a ser 41.

O factor de crescimento de carga utilizado foi sempre igual a 1.01, em cada FC. Todas as simulações foram realizadas com um PC pentium IV a 2.8 GHz com 512 MB de memória RAM.

A escolha do tipo de rede neuronal dependerá do objectivo que se pretende para a rede neuronal. As cargas caracterizarão o padrão correspondente a cada distância ao ponto de colapso. O reconhecimento de padrões, a partir das cargas, será realizado por uma RNA do tipo PMC. O algoritmo será o RP para a realização da aprendizagem supervisionada da rede. As RNA do tipo PMC e o algoritmo de aprendizagem RP foram estudados com bastante detalhe no capítulo 4.

6.2.1 – Dados para a aprendizagem da rede neuronal

6.2.1.1 – Cálculo dos dados para a aprendizagem da rede neuronal

O conjunto de dados para a aprendizagem da rede neuronal deverá caracterizar o espaço possível de pontos de funcionamento da rede de testes. O uso de configurações de cargas aleatórias é a solução mais usada para concretizar esse objectivo. As 41 cargas base, da rede de testes, são afectadas por 41 números aleatórios diferentes, constituindo a configuração de partida para a simulação. A partir desta configuração base aleatória são obtidas as curvas FSQV.

Na figura 6.1 apresentam-se as curvas FSQV para a carga base, a tracejado, e as restantes quinze curvas correspondentes a quinze configurações aleatórias. Todas as 15 curvas têm um PMC muito superior à primeira curva o que indicia a utilização de cargas base muito baixas. Este tipo de cargas base, típicas da zona do diagrama de cargas referente ao vazio, só caracteriza uma parte do espaço de pontos de funcionamento possíveis.

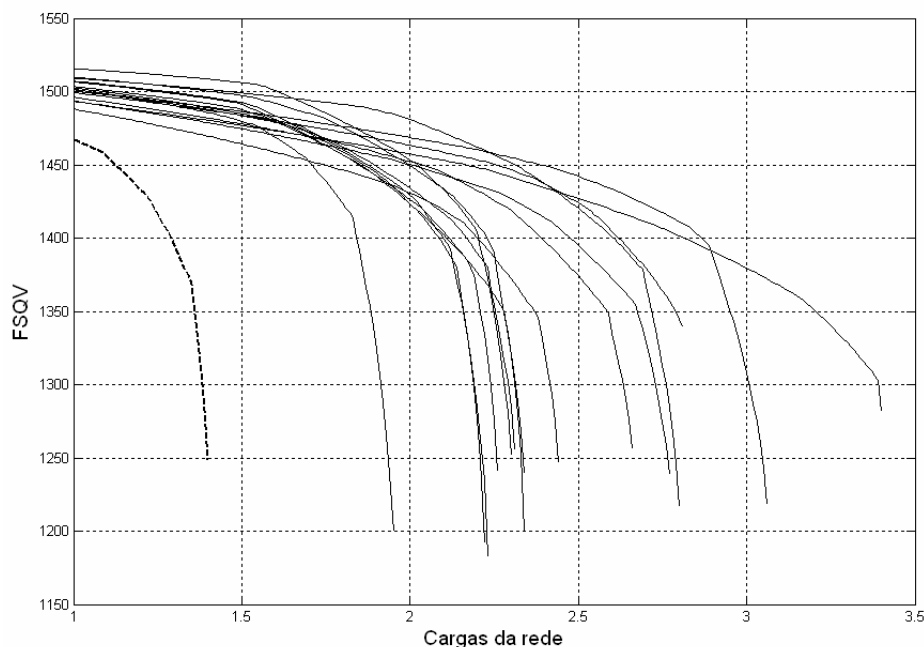


Figura 6.1 – Curvas FSQV, cargas base (tracejado) e as restantes com as cargas base afectadas por um factor aleatório

A explicação para este facto é dada pela figura 6.2, que apresenta a distribuição dos números aleatórios para as dezasseis curvas FSQV referentes aos 41 barramentos. O valor 1 corresponde à curva FSQV base, que não foi afectado por números aleatórios. Todos os outros valores correspondem aos factores aleatórios que afectaram as cargas e pertencem todos ao intervalo entre 0 e 1.

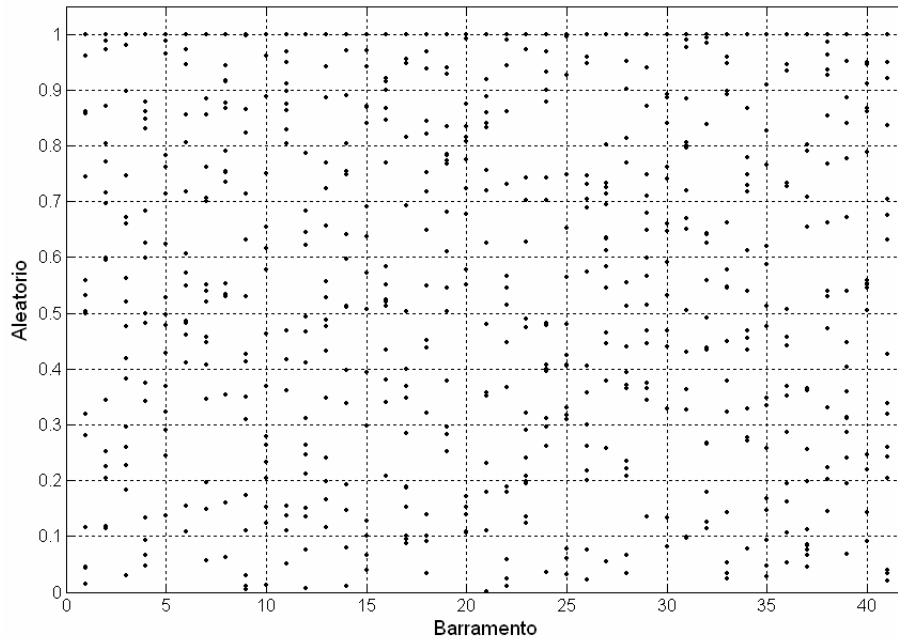


Figura 6.2 – Valores dos factores aleatórios que afectam as cargas das simulações referentes à figura 6.1

A aplicação deste factor aleatório implica que as configurações de cargas sejam inferiores à configuração de cargas base, e em consequência os PMC são sempre superiores ao referente à carga base. Uma maneira de ultrapassar esta limitação é a de multiplicar o factor aleatório por uma constante, por exemplo 2, para que os factores aleatórios possam ficar distribuídos em torno de um valor médio 1 correspondente à configuração de cargas base.

Na figura 6.3 apresentam-se os factores aleatórios agora multiplicados por uma constante igual a 2. Neste caso a distribuição é praticamente uniforme em torno do valor 1, o que pressupõe à partida que as simulações seguirão também esta tendência.

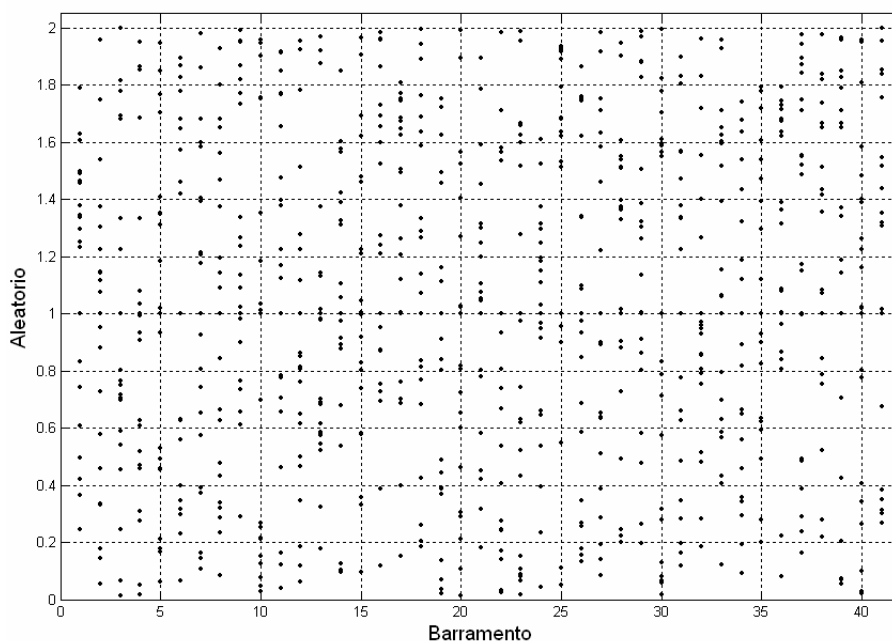


Figura 6.3 – Valores dos factores aleatórios que afectam as cargas das simulações multiplicadas por uma constante 2

Na figura 6.4 apresentam-se as curvas FSQV, em que a curva correspondente à carga base se encontra a tracejado, e as restantes quinze curvas cujas cargas base além de serem afectadas por factores aleatórios diferentes, foram também afectadas por um valor constante igual a 2, encontram-se a cheio. Sem dúvida, que agora, as curvas FSQV caracterizam melhor o espaço dos pontos de funcionamento possível, já que 7 têm PMC superiores e 8 têm PMC inferiores, à curva FSQV base. Confirma-se assim que a distribuição das curvas correspondeu à distribuição dos factores aleatórios em torno de um valor médio.

Se com a constante igual a 1 as curvas FSQV tinham todas PMC superiores à curva base, definindo uma zona limite dos pontos de funcionamento, com a constante igual a 2 é possível distribuir as curvas FSQV, em igual número, em torno de uma curva FSQV base, definindo uma zona central dos pontos de funcionamento. Tem interesse agora, a descoberta da outra zona limite do espaço possível de pontos de funcionamento, por alteração dos valores da constante para valores superiores a 2.

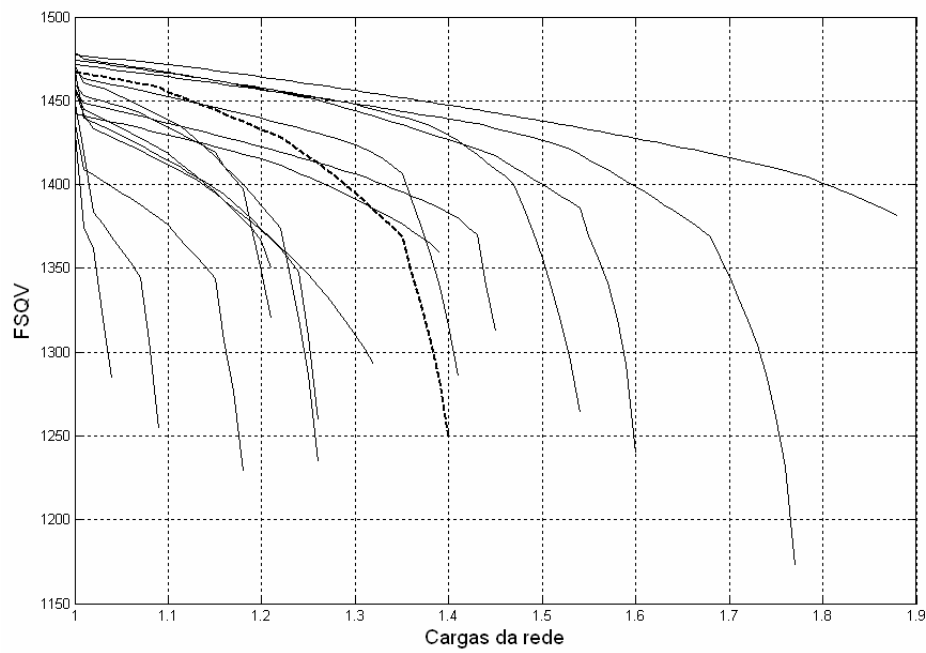


Figura 6.4 – Curvas FSQV, cargas base (tracejado) e as restantes com as cargas base afectadas por um factor aleatório e a constante 2

Nas figuras 6.5 e 6.6 apresentam-se os factores aleatórios e as curvas FSQV com a aplicação de um factor 2,5.

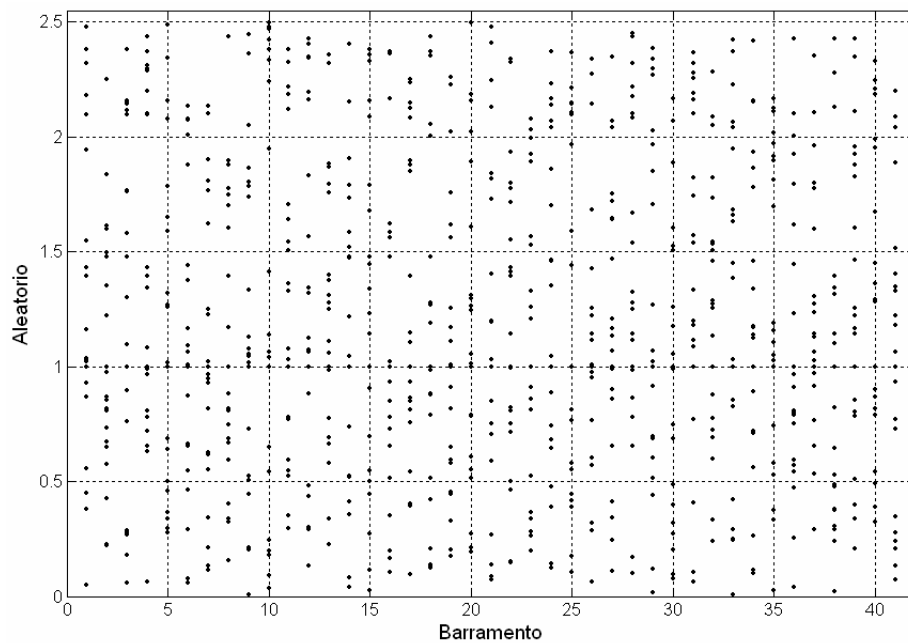


Figura 6.5 – Valores dos factores aleatórios que afectam as cargas das simulações multiplicadas por uma constante 2,5

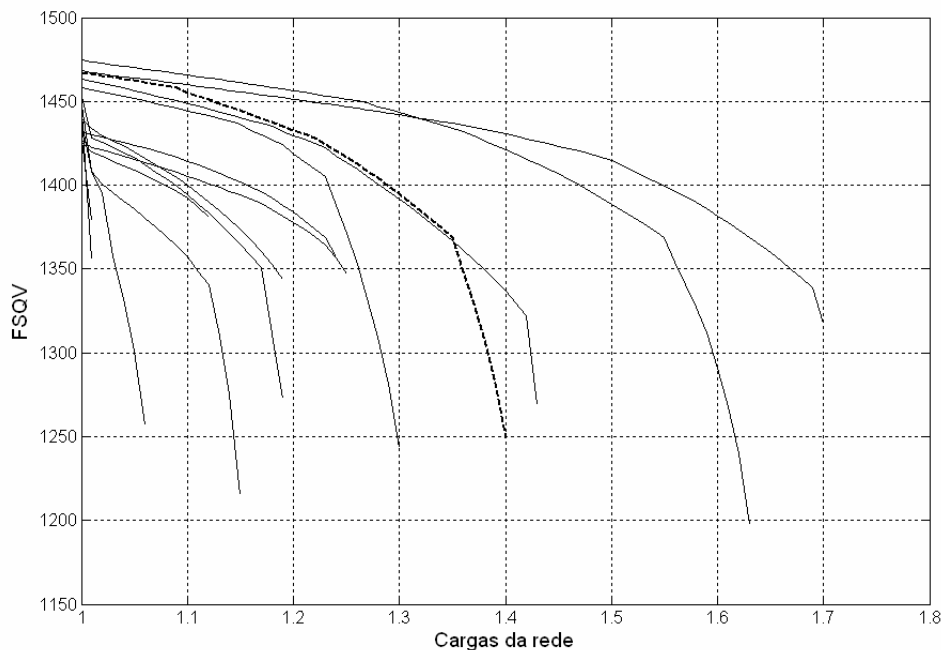


Figura 6.6 – Curvas FSQV, cargas base (tracejado) e as restantes com as cargas base afectadas por um factor aleatório e a constante 2,5

A análise das figuras 6.5 e 6.6 leva a concluir que o aumento da constante para o valor 2,5 descentra o valor médio dos factores aleatórios e, em consequência, 12 curvas FSQV têm um valor do PMC inferior ao valor da curva base e 3 superior.

Na tentativa de se encontrar o valor limite da constante subiu-se o seu valor para 3. Não foi possível utilizar este valor por dar problemas de convergência logo ao primeiro FC. Supõe-se que a configuração de cargas ao exceder a configuração correspondente ao colapso provoque este tipo de problemas. Uma nova tentativa, agora bem sucedida, foi realizada com a utilização do valor de constante 2,8. Nas figuras 6.7 e 6.8 apresentam-se os factores aleatórios e as curvas FSQV com a aplicação de um factor 2,8.

A análise da figura 6.8 leva a concluir que, com o valor da constante 2,8, estamos perto da outra situação extrema. Das 15 simulações efectuadas, em 8 simulações foi atingido o colapso logo no primeiro FC. As outras 7 simulações têm um PMC muito baixo em relação ao PMC da curva FSQV base.

Após análise dos resultados das simulações realizadas, e dado que se pretende que o conjunto de aprendizagem caracterize o melhor possível o espaço de pontos de funcionamento possível, as simulações para a realização do conjunto de aprendizagem da rede neuronal irá utilizar o valor 2 para constante.

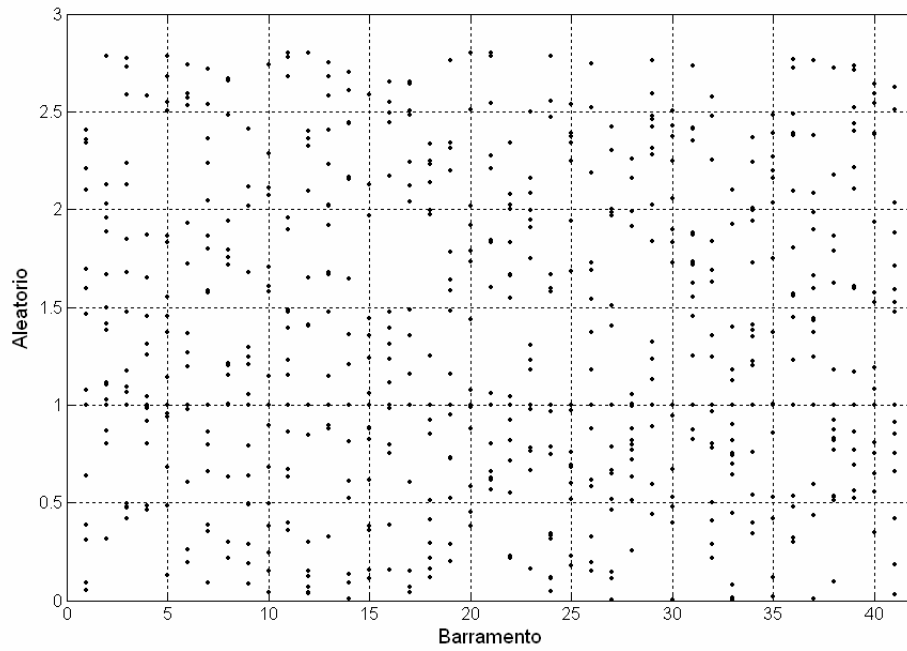


Figura 6.7 – Valores dos factores aleatórios que afectam as cargas das simulações multiplicadas por uma constante 2,8

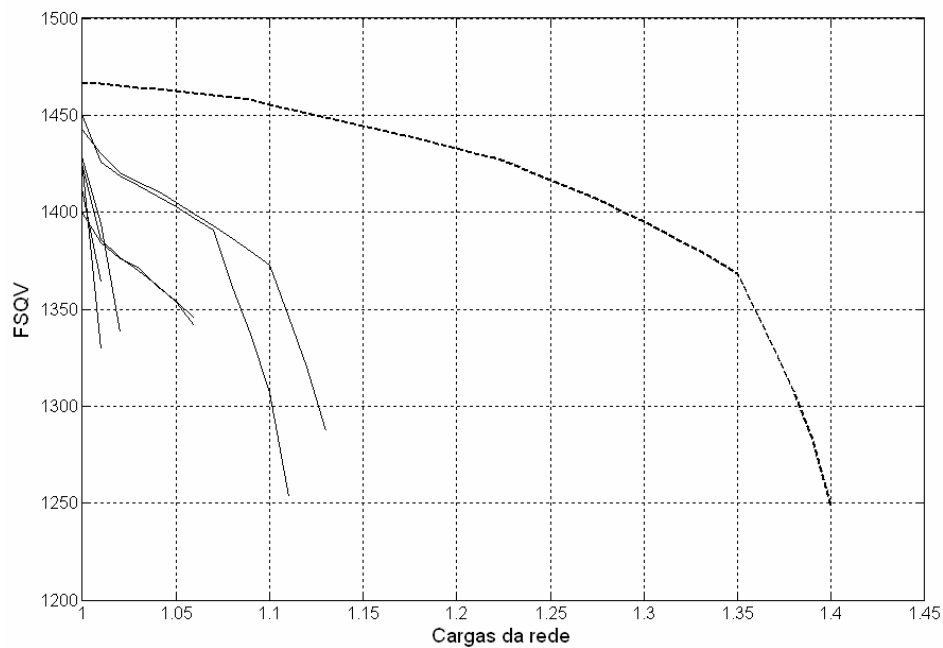


Figura 6.8 – Curvas FSQV, cargas base (tracejado) e as restantes com as cargas base afectadas por um factor aleatório e a constante 2,8

6.2.1.2 – Normalização dos dados para a aprendizagem da rede neuronal

Os dados para a aprendizagem da rede neuronal necessitam de uma normalização para ficarem de acordo com o intervalo usado na função de activação. No caso de usar a função de activação logística, nas camadas escondidas da rede neuronal, os dados de entrada terão que pertencer ao intervalo $[0,1]$. Caso se use a função de activação tangente hiperbólica terão que pertencer ao intervalo $[-1,1]$. Na camada de saída como será usada a função de activação linear, os dados alvo, *target*, não necessitam de nenhuma normalização.

6.2.2 – A aprendizagem da rede neuronal

O conjunto de dados para a aprendizagem da rede neuronal foi constituído com os resultados de 100 simulações utilizando factores aleatórios e um valor 2 para a constante. Estas 100 simulações são constituídas por 4021 pontos de funcionamento da rede de testes. Cada ponto de funcionamento é caracterizado por um vector coluna com 41 valores correspondendo às 41 cargas reactivas dos barramentos da rede de testes que irão ser as entradas da RNA. Cada ponto de funcionamento tem uma correspondente distância ao colapso que será o alvo a ser atingido pela rede neuronal.

O conjunto de dados para a aprendizagem foi dividido em duas partes. A primeira parte corresponde ao conjunto de treino e é constituída por $\frac{3}{4}$ do primeiro conjunto de dados. A segunda parte corresponde ao conjunto de validação e é constituída pelo restante $\frac{1}{4}$ de dados. Aplicando as regras definidas, o conjunto de treino é constituído pelos 1º, 2º, 3º, 5º, 6º, 7º, 9º, 10º, 11º.... vectores colunas do conjunto inicial de dados para a aprendizagem. O conjunto de validação é constituído pelos 4º, 8º, 12º.... vectores colunas do conjunto inicial de dados para a aprendizagem. A separação do vector linha com as distâncias ao colapso seguiu o mesmo critério.

As redes neuronais, o seu treino e validação foram realizadas pelo módulo disponibilizado pelo matlab para redes neuronais "nntool".

6.2.2.1 – A aprendizagem da primeira rede neuronal

A primeira rede neuronal é constituída por uma camada de entrada, uma camada escondida e uma camada de saída. A camada de entrada tem 41 entradas. A camada escondida utiliza a função de activação logística e é constituída por 10 neurónios totalmente ligados às 41 entradas. A camada de saída utiliza a função de activação linear e é constituída por 1 neurónio totalmente ligado aos neurónios da camada escondida, ou seja tem uma topologia 41-10-1. Por cada iteração o algoritmo de aprendizagem terá que calcular 431 parâmetros livres, ou seja, 410 pesos correspondendo às 41 sinapses de ligação a cada um dos 10 neurónios da camada escondida, mais 10 pesos das sinapses de ligação dos neurónios da camada escondida ao neurónio da camada de saída e mais 11 bias correspondendo aos 10 neurónios da camada escondida e um da camada de saída e que totalizam 431 parâmetros livres.

A aprendizagem da rede neuronal será do tipo supervisionada, ver secção 4.8, e o critério de paragem para o algoritmo é o valor da função de erro da distância ao colapso.

A figura 6.9 apresenta a curva de erro do treino da rede neuronal, para o critério de paragem de valor de 10^{-8} .

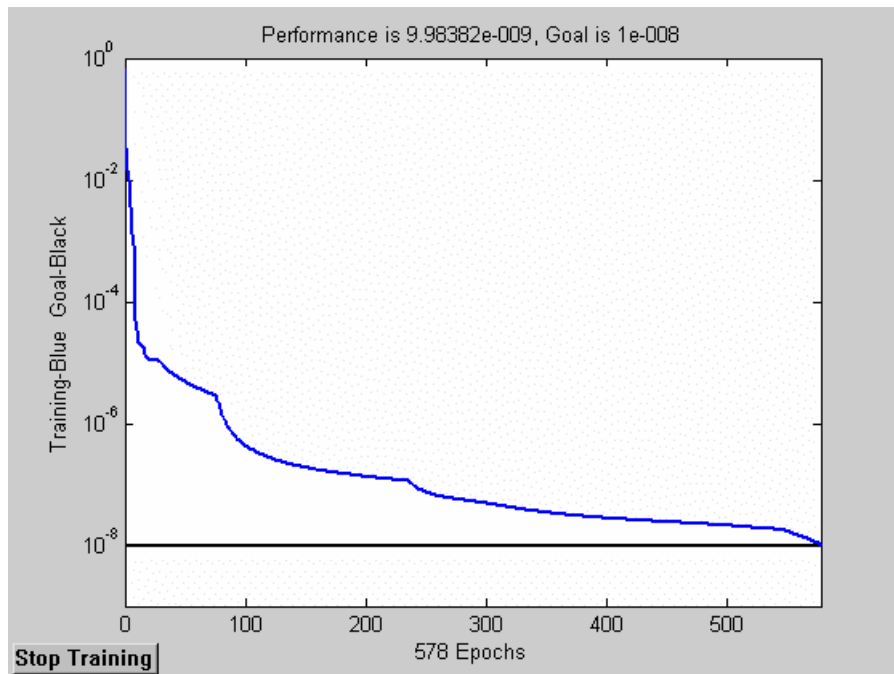


Figura 6.9 – Curva da função de erro do treino da rede neuronal para o critério de paragem de 10^{-8} (rede com uma camada escondida com 10 neurónios)

Como se pode ver na figura 6.9, para o treino da rede neuronal com o critério de paragem de 10^{-8} foram necessárias 578 iterações, *epochs*. Este treino demorou 12 minutos a ser

Resultados Numéricos da Aplicação de Redes Neurais Artificiais realizado. A validação demorou poucos segundos, pois com a rede treinada e utilizando unicamente o conjunto de dados de entrada de validação obtêm-se os resultados referentes a estes padrões de uma forma muito rápida.

Na figura 6.10 apresenta-se os erros percentuais de comparação das distâncias ao colapso entre os resultados da rede neuronal, calculadas pela rede neuronal para o conjunto de treino, e os resultados reais.

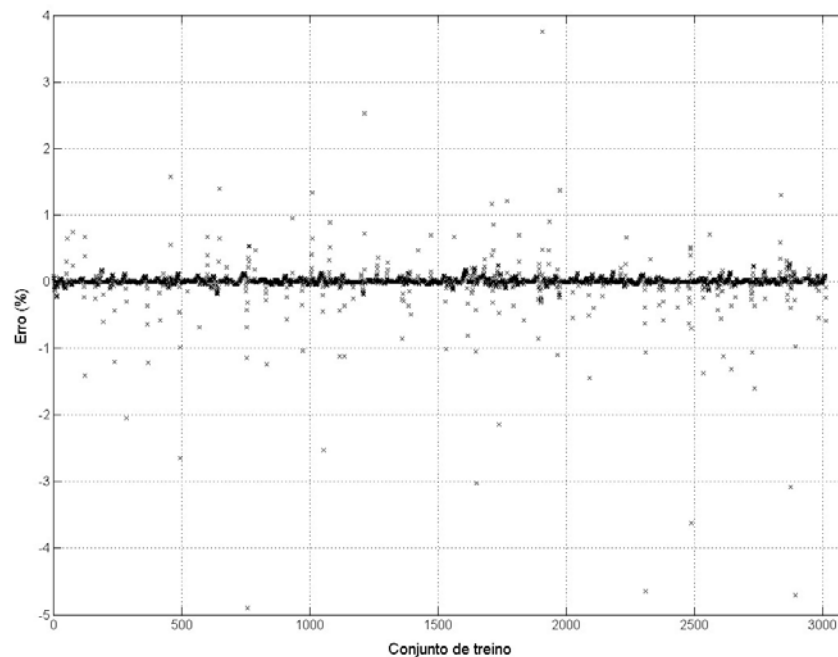


Figura 6.10 – Erros percentuais de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de treino) e reais (rede com uma camada escondida com 10 neurónios e critério de paragem de 10^{-8})

Na figura 6.11 apresentam-se os erros percentuais de comparação das distâncias ao colapso entre os resultados da rede neuronal, calculadas pela rede neuronal para o conjunto de validação, e os resultados reais.

A análise às figuras 6.11 e 6.12 conclui-se que o módulo do erro máximo percentual para o conjunto de treino é de 4,90 % e para o conjunto de validação é de 7,17 %.

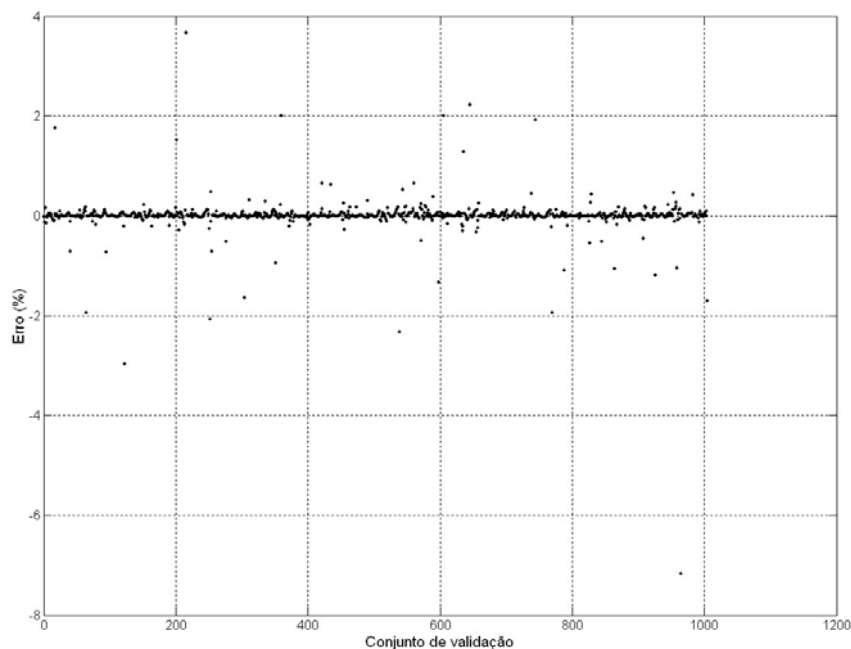


Figura 6.11 – Erros percentuais de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de validação) e reais (rede com uma camada escondida com 10 neurónios e critério de paragem de 10^{-8})

Como o módulo dos erros máximos percentuais são altos e dado que o treino desta rede é relativamente rápida e como também o andamento da curva do erro para a convergência indicia a possibilidade de se poder baixar o critério de paragem, é realista baixar o valor do critério de paragem da aprendizagem da rede para o valor 10^{-9} .

Na figura 6.12 apresenta-se a curva da função de erro do treino agora para o critério de paragem 10^{-9} . Com a diminuição do critério de paragem de 10^{-8} para 10^{-9} o número de iterações aumentou de 578 para 1462 e o tempo gasto no treino da rede neuronal também aumentou para 30 minutos.

Na figura 6.13 e 6.14 apresentam-se os erros percentuais para o critério de paragem de 10^{-9} respectivamente para o conjunto de treino e validação.

A redução do valor do critério de paragem do algoritmo de aprendizagem permitiu a redução dos valores máximos dos erros, em módulo, para 1,19 e 1,53 % respectivamente para o treino e validação. Se os módulos dos erros máximos já são aceitáveis, o problema é colocado agora da seguinte forma: será ainda possível baixar o valor do critério de paragem? A próxima simulação dará resposta a esta pergunta.

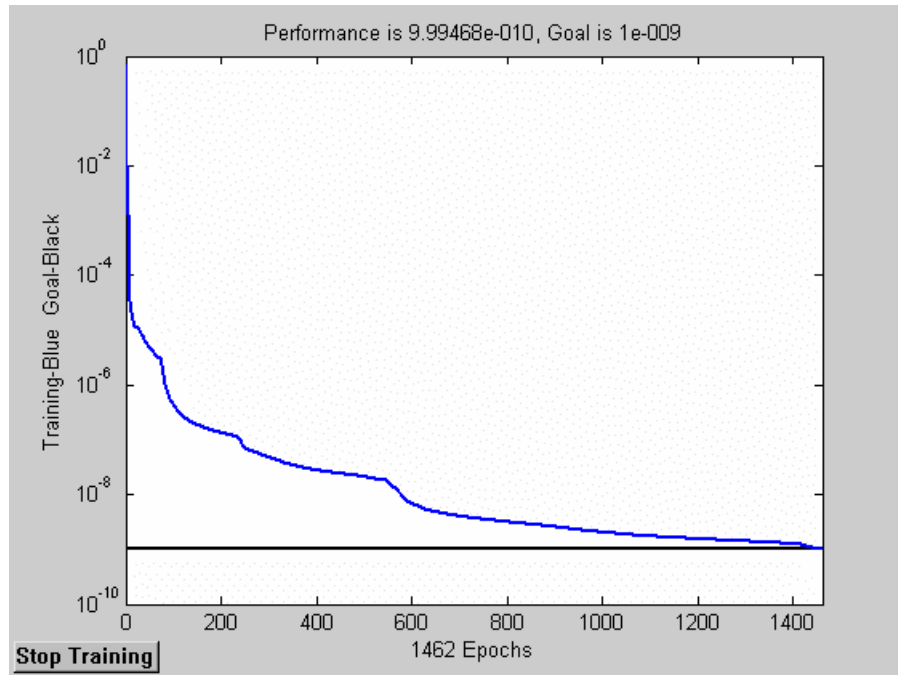


Figura 6.12 – Curva da função de erro do treino da rede neuronal para o critério de paragem de 10^{-9} (rede com uma camada escondida com 10 neurónios)

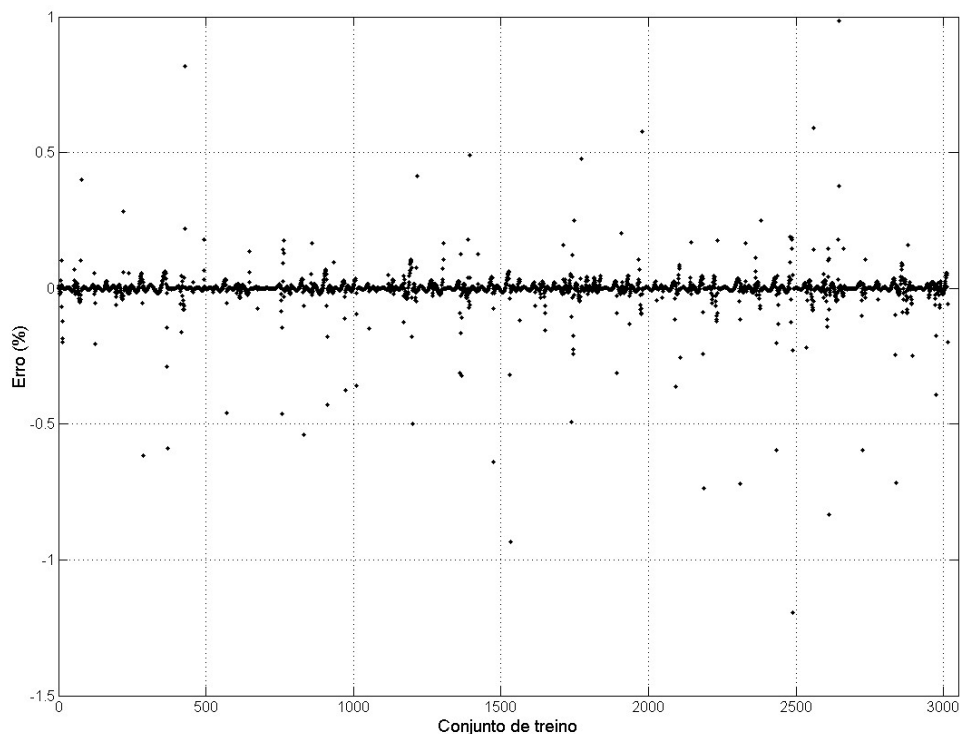


Figura 6.13 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de treino) e reais (rede com uma camada escondida com 10 neurónios e critério de paragem de 10^{-9})

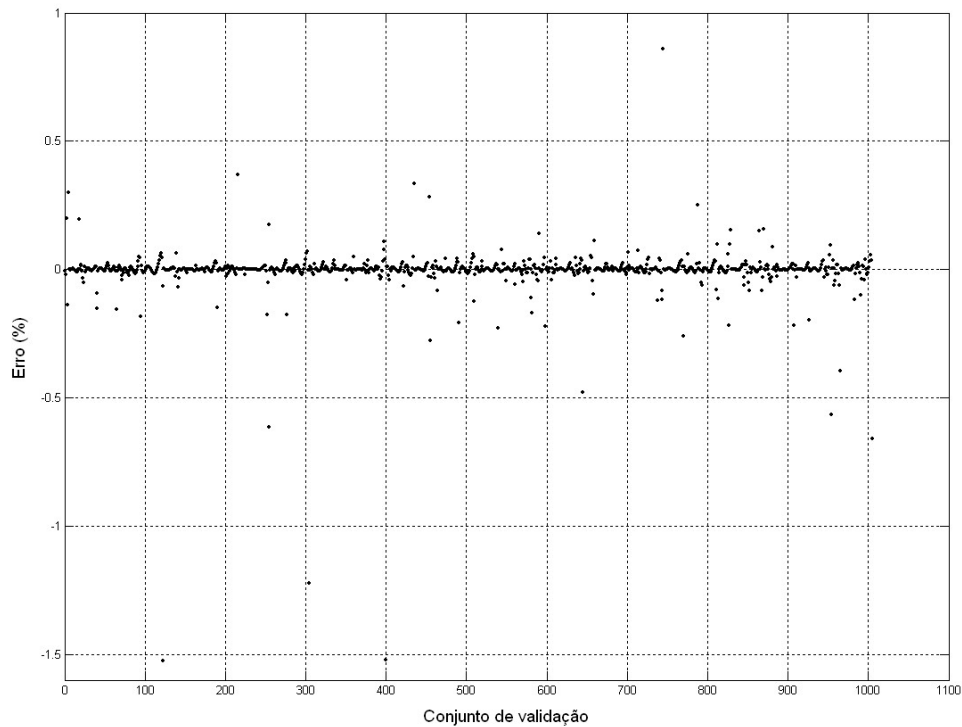


Figura 6.14 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de validação) e reais (rede com uma camada escondida com 10 neurónios e critério de paragem de 10^{-9})

Na figura 6.15 apresenta-se a curva da função de erro do treino agora para o critério de paragem 10^{-10} .

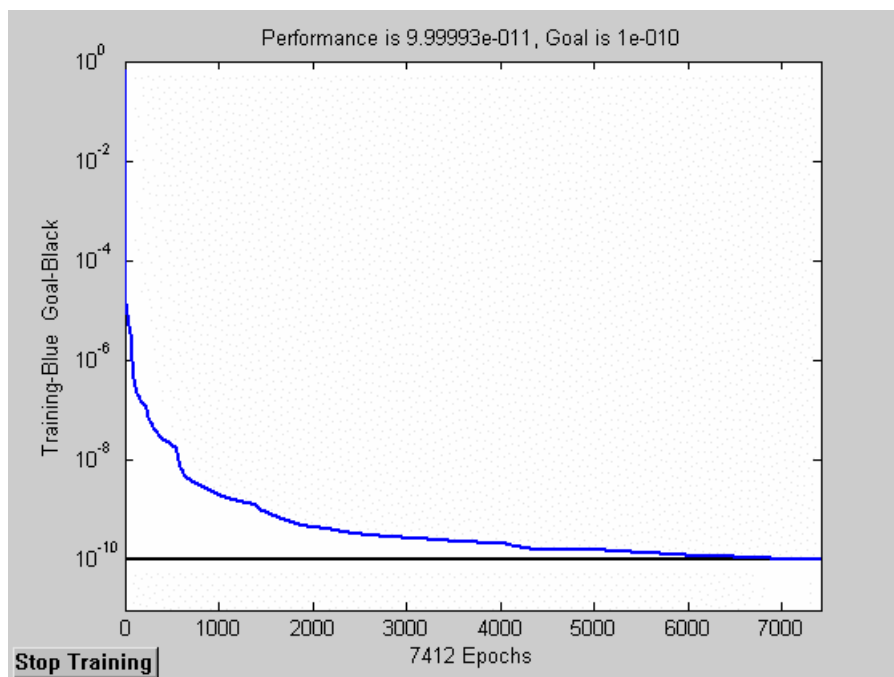


Figura 6.15 – Curva do erro do treino da rede neuronal para o critério de paragem de 10^{-10} (rede com uma camada escondida com 10 neurónios)

Com a diminuição do critério de paragem de 10^{-9} para 10^{-10} o número de iterações, para a aprendizagem da rede neuronal, aumentou 406 % de 1462 para 7412 e demorou 159 minutos. Se na última curva com o critério de paragem de 10^{-9} , ver figura 6.12, havia já um início de patamar no final da curva, agora para atingir o critério de paragem de 10^{-10} foram necessárias cinco vezes mais iterações e o andamento na curva, na sua parte final, é claramente em patamar o que indicia estarmos no limite de convergência desta rede neuronal para um número de iterações e tempo gasto na simulação razoáveis.

Na figura 6.16 e 6.17 apresentam-se os erros para o critério de paragem de 10^{-10} respectivamente para o conjunto de treino e validação.

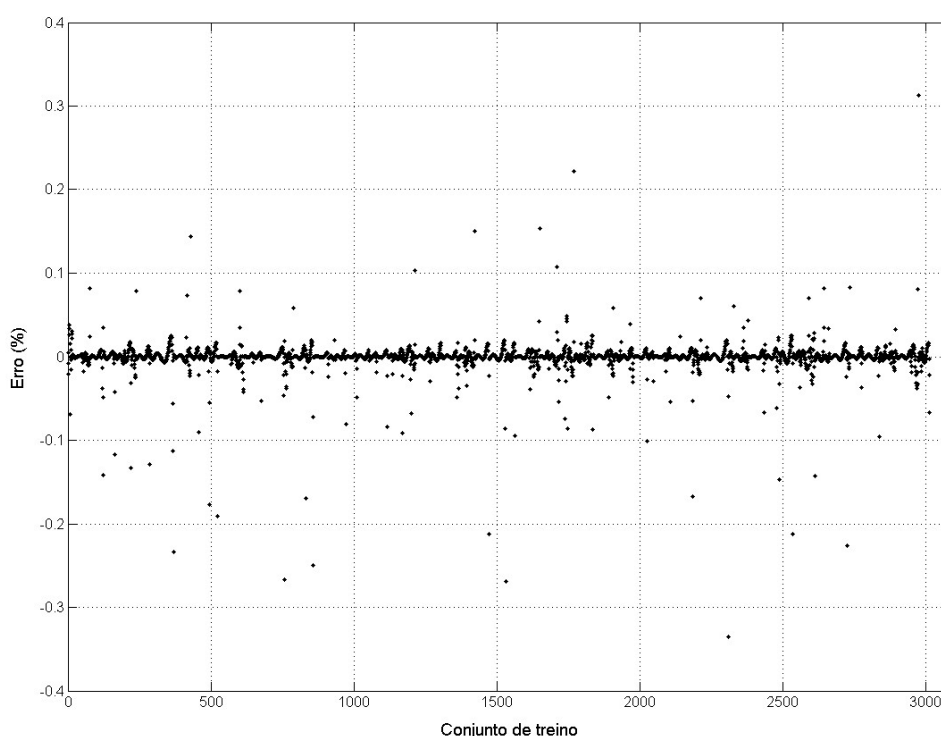


Figura 6.16 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de treino) e reais (rede com uma camada escondida com 10 neurónios e critério de paragem de 10^{-10})

A redução do valor do critério de paragem para o valor de 10^{-10} permitiu a redução dos valores máximos dos erros, em módulo, para 0,34 e 0,61 % respectivamente para o treino e validação.

Na tabela 6.1 apresentam-se o resumo dos resultados das três simulações realizadas com a primeira rede neuronal.

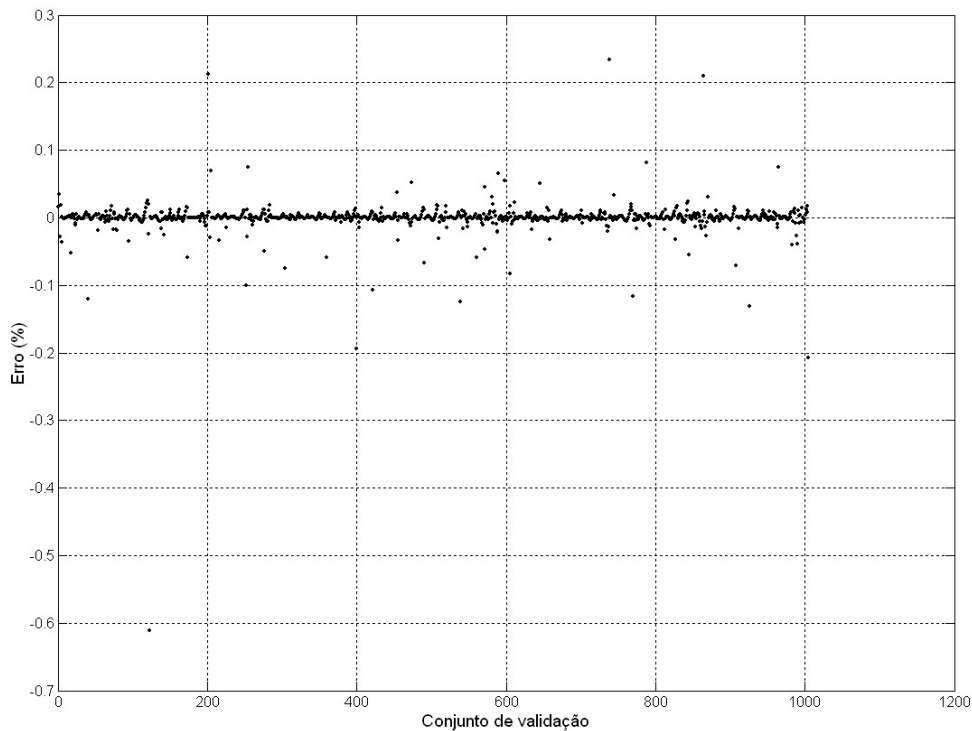


Figura 6.17 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de validação) e reais (rede com uma camada escondida com 10 neurónios e critério de paragem de 10^{-10})

Tabela 6.1 – Resultados das três simulações efectuadas com a rede neuronal com 10 neurónios na única camada escondida

Número de Neurónios (a)	Critério de paragem	Número de iterações	Tempo do treino (min)	Número de iterações /minuto	Módulo do Erro Máximo do Treino		Módulo do Erro Máximo da Validação	
					(%)	Red. (%)	(%)	Red. (%)
10	10^{-8}	578	12	48	4,90	-	7,17	-
10	10^{-9}	1466	31	47	1,19	- 76	1,53	- 79
10	10^{-10}	7412	159	47	0,34	- 71	0,61	- 60
NOTA: a) Na única camada escondida								

Esta primeira rede neuronal utilizou 10 neurónios na camada escondida. Estas três simulações permitiram avaliar a possibilidade de se poder baixar o valor do critério de paragem e a sua influência na performance desta rede neuronal. Da análise da tabela 6.1 pode-se concluir que, com a redução do critério de paragem:

- o número de iterações aumentou 154 % e 406 %, em relação ao valor anterior, respectivamente para o valor de 10^{-9} e 10^{-10} ;

- o tempo necessário à convergência também aumentou, em igual percentagem, devido ao número de iterações por minuto se manter constante;
- os erros baixaram 76 % e 79%, relativamente ao valor 10^{-9} , e 71 % e 60 %, relativamente ao valor 10^{-10} , respectivamente para o treino e validação.

6.2.2.2 – Aprendizagem da segunda rede neuronal

A segunda rede neuronal só difere da primeira quanto ao número de neurónios da camada escondida, que passou a ser constituída por 20 neurónios. Como se pretende avaliar em relação à melhor performance das várias simulações obtidas com 10 neurónios na camada escondida, o critério de paragem é, à partida, fixado no valor de 10^{-10} , valor com que se obtiveram os melhores resultados.

Na figura 6.18 apresenta-se a curva do erro do treino para o critério de paragem 10^{-10} e para uma rede neuronal com 20 neurónios na camada escondida.

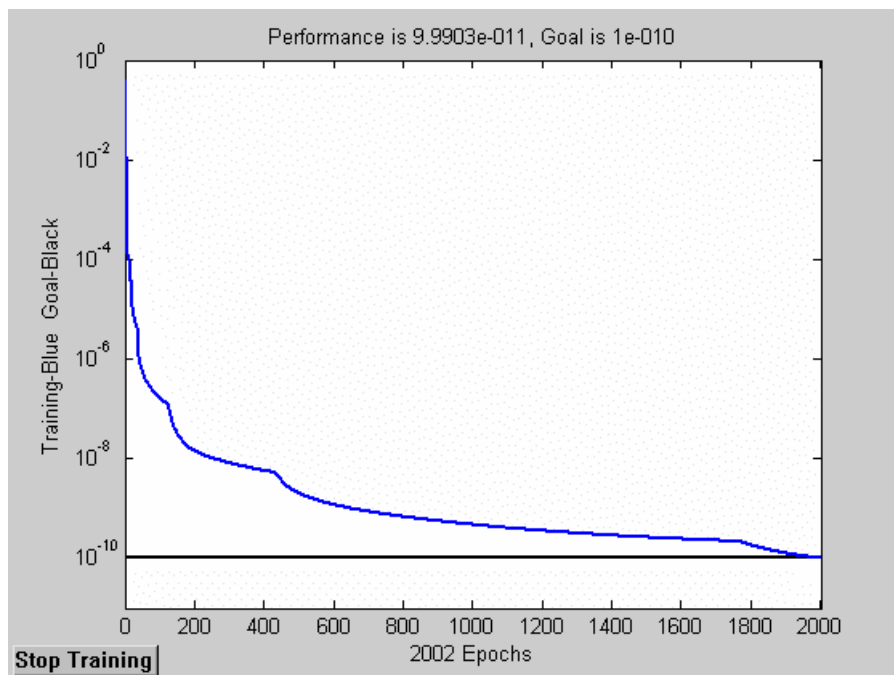


Figura 6.18 – Curva do erro do treino da rede neuronal para o critério de paragem de 10^{-10} (rede com uma camada escondida com 20 neurónios)

O aumento do número de neurónios na camada escondida de 10 para 20, e para o mesmo critério de paragem, reduziu o número de iterações, de 7412 para 2002, e o

tempo, de 159 para 140 minutos, necessários para a convergência. Outro aspecto a considerar na análise à figura 6.18 é o forte indicio de se poder reduzir o critério de paragem devido ao andamento da curva na sua parte final, ou seja, ainda está longe o patamar que apresenta a figura 6.15 na mesma zona.

É interessante também verificar uma semelhança das curvas das figuras 6.15 e 6.18. O aumento do número de neurónios permitiu atingir o mesmo valor de erro com um menor número de iterações o que permite dizer que a curva se deslocou na vertical para baixo.

Nas figuras 6.19 e 6.20 apresentam-se os erros para o critério de paragem de 10^{-10} respectivamente para o conjunto de treino e validação para a rede com 20 neurónios na camada escondida.

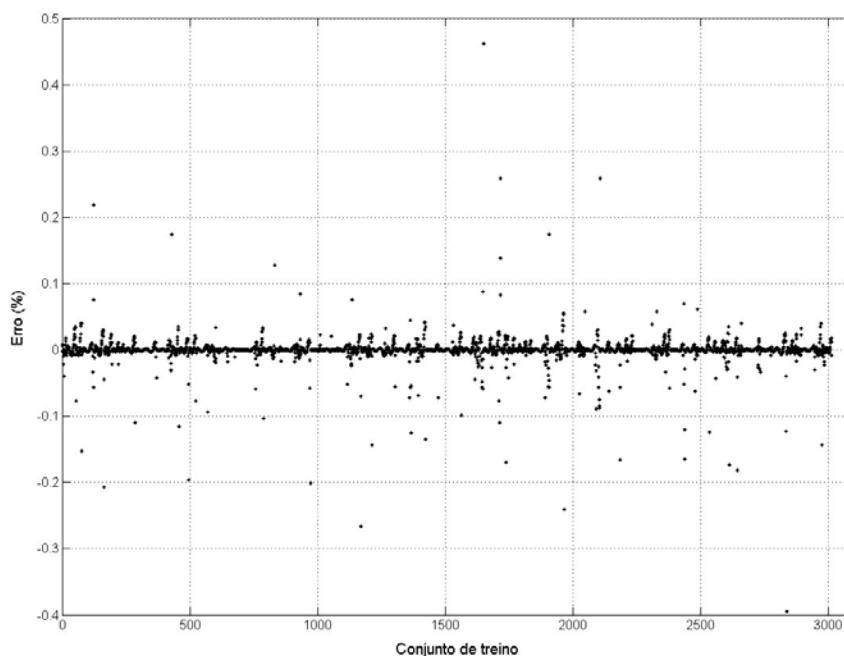


Figura 6.19 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de treino) e reais (rede com uma camada escondida com 20 neurónios e critério de paragem de 10^{-10})

Os valores máximos dos erros, em módulo, são 0,46 e 0,32 % respectivamente para o treino e validação. O menor número de iterações indicia que ainda estamos longe do limite para esta RNA, por isso a próxima simulação utilizará para o critério de paragem o valor 10^{-11} .

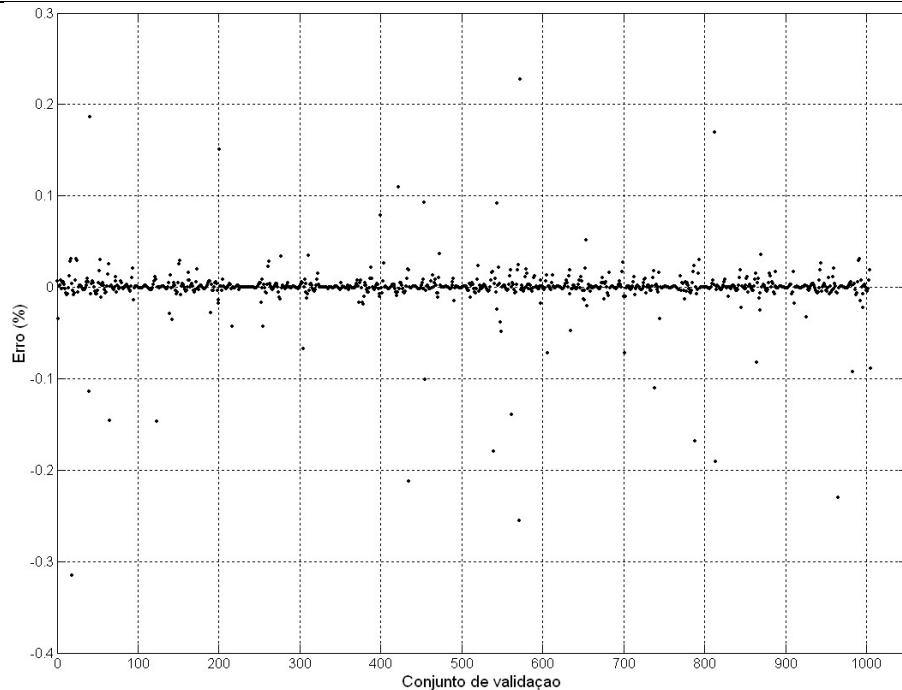


Figura 6.20 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de validação) e reais (rede com uma camada escondida com 20 neurónios e critério de paragem de 10^{-10})

Na figura 6.21 apresenta-se a curva do erro médio da função custo do treino para o critério de paragem 10^{-11} e para uma rede neuronal com 20 neurónios na camada escondida. Este treino teve a particularidade de não ter sido iniciado a partir do zero, mas a partir da rede neuronal anterior, treinada até ao critério de paragem 10^{-10} . Desta forma, poupa-se o tempo correspondente ao treino anterior.

Nas figuras 6.22 e 6.23 apresentam-se os erros para o critério de paragem de 10^{-11} respectivamente para o conjunto de treino e validação, para a rede com 20 neurónios na camada escondida.

Os valores máximos, em módulo, dos erros são 0,13 e 0,32 % respectivamente para o treino e validação. Como o erro máximo da validação é um ponto isolado, ver figura 6.23, ao excluir este erro de um valor muito perto de zero, o erro máximo passa para 0.11 %.

Com o aumento do número de neurónios na camada escondida, o número de parâmetros livres aumenta para 861, sendo 820 pesos correspondendo às 41 sinapses de ligação a cada um dos 20 neurónios da camada escondida, 20 pesos das sinapses de ligação dos neurónios da camada escondida ao neurónio da camada de saída e mais 21 bias correspondendo aos 20 neurónios da camada escondida e um da camada de saída. O aumento de parâmetros livres provocou um aumento do tempo de cálculo por iteração e naturalmente o número de iterações por minuto desceu de 47, com 10 neurónios, para 14.

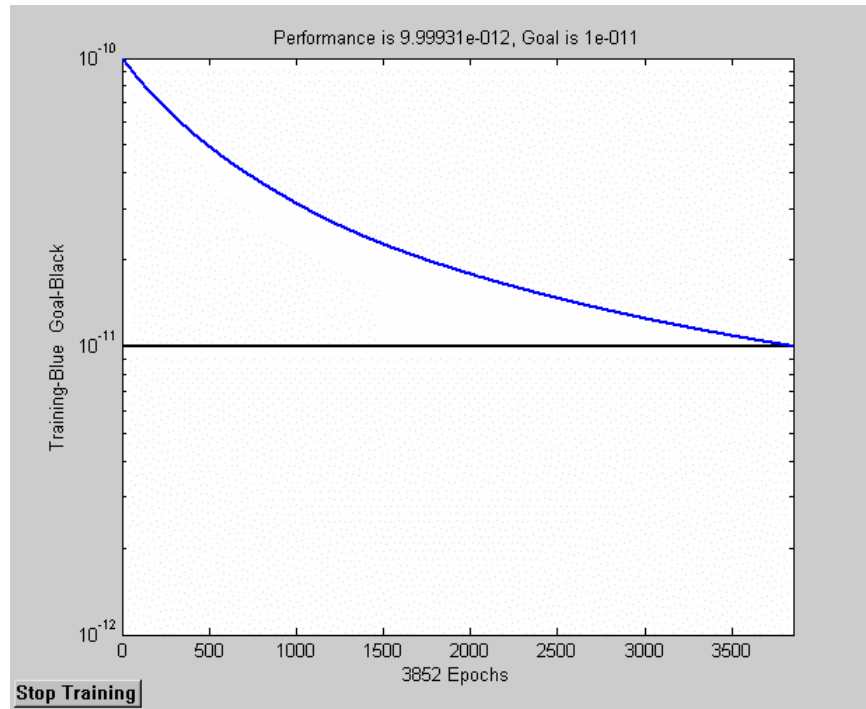


Figura 6.21 – Curva do erro do treino da rede neuronal para o intervalo do critério de paragem de 10^{-10} a 10^{-11} (rede com uma camada escondida com 20 neurónios)

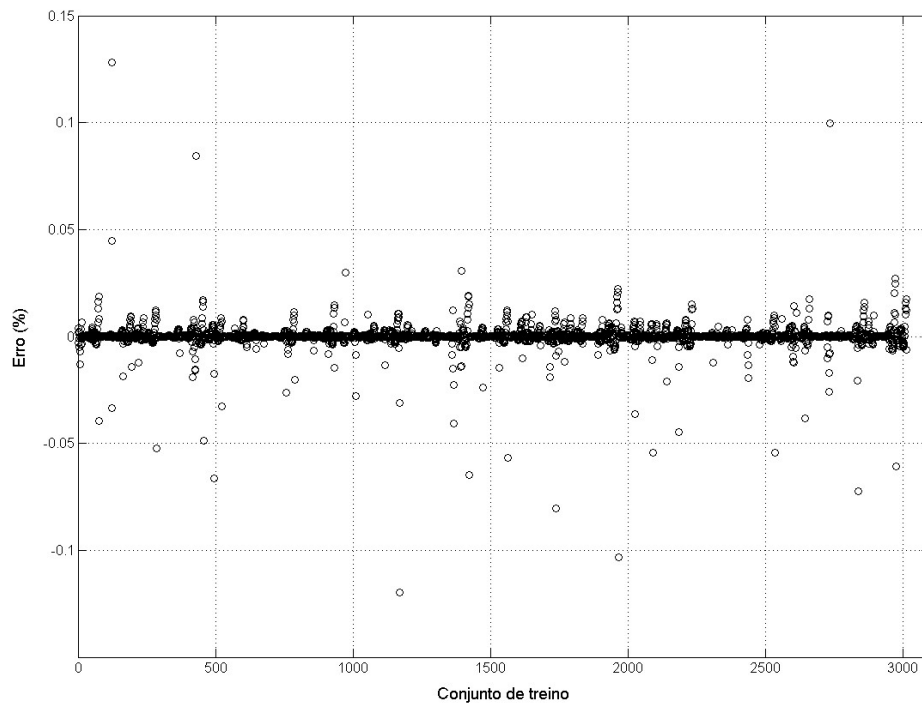


Figura 6.22 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de treino) e reais (rede com uma camada escondida com 20 neurónios e critério de paragem de 10^{-11})

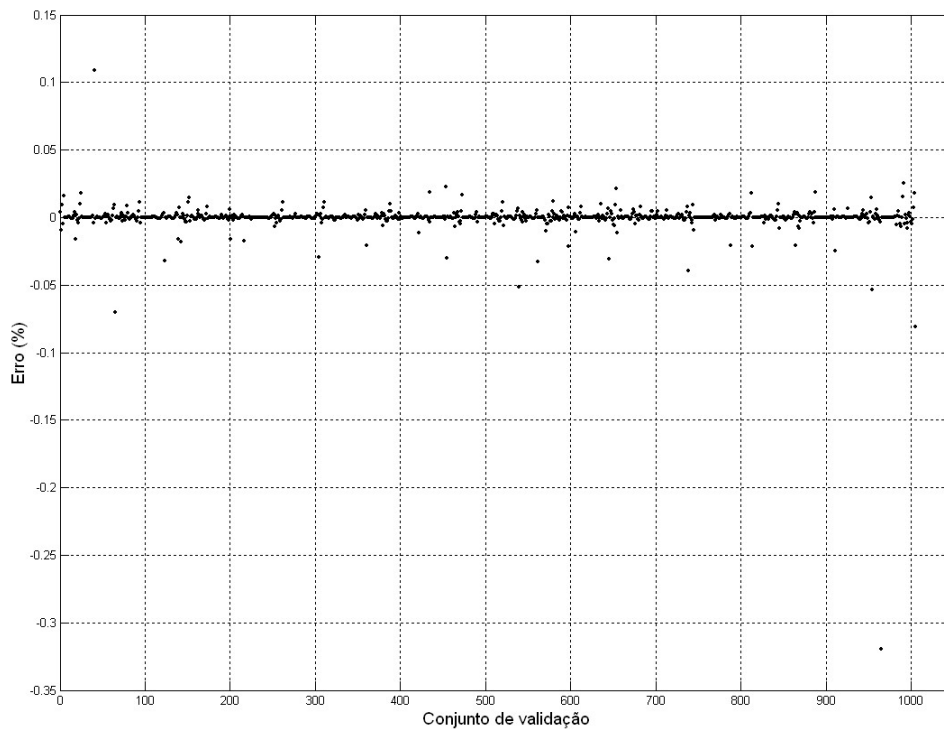


Figura 6.23 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de validação) e reais (rede com uma camada escondida com 20 neurónios e critério de paragem de 10^{-11})

Na tabela 6.2 apresenta-se o resumo dos resultados de três simulações, correspondendo uma à melhor realizada com a primeira RNA, as outras duas com a segunda RNA.

Tabela 6.2 – Resumo do melhor resultado com a rede neuronal com 10 neurónios e os referentes às duas simulações efectuadas com 20 neurónios na única camada escondida

Número de Neurónios (a)	Critério de paragem	Número de Iterações	Tempo do treino (min)	Número de Iterações /minuto	Módulo do Erro Máximo do Treino (%)	Módulo do Erro Máximo da Valid. (%)
10	10^{-10}	7412	159	47	0,34	0,61
20	10^{-10}	2002	140	14	0,46	0,32
20	10^{-11}	5854	410	14	0,13	0,11
NOTA: a) Na única camada escondida						

O tempo necessário para convergir para o valor de erro de 10^{-10} , baixou de 159 minutos para 140, mas devido a um menor número de iterações necessários, 2002 contra 7412, pois como já foi referido, o número de iterações por minuto baixou de 47 para 14. Os erros para o mesmo valor de convergência são praticamente iguais, mas para o valor 10^{-11} os erros baixaram para valores quatro vezes menores.

6.2.2.3 – Aprendizagem da terceira rede neuronal

A terceira RNA é igual à segunda e unicamente difere no número de neurónios da camada escondida que passou a ser constituída por 30. Como se pretende avaliar em relação às melhores performances obtidas com 10 e 20 neurónios na camada escondida, o critério de paragem é, à partida, fixada no valor de 10^{-10} , para a primeira simulação e 10^{-11} , para a segunda simulação.

Na figura 6.24 e 6.25 apresentam-se as curvas do erro do treino para o critério de paragem 10^{-10} e 10^{-11} para a rede neuronal com 30 neurónios na camada escondida.

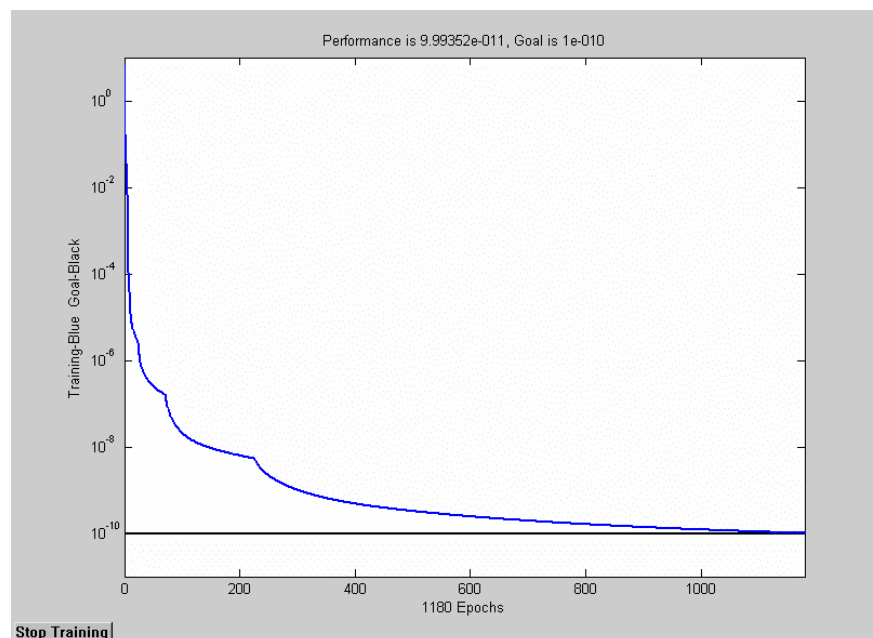


Figura 6.24 – Curva do erro do treino da rede neuronal para o critério de paragem de 10^{-10} (rede com uma camada escondida com 30 neurónios)

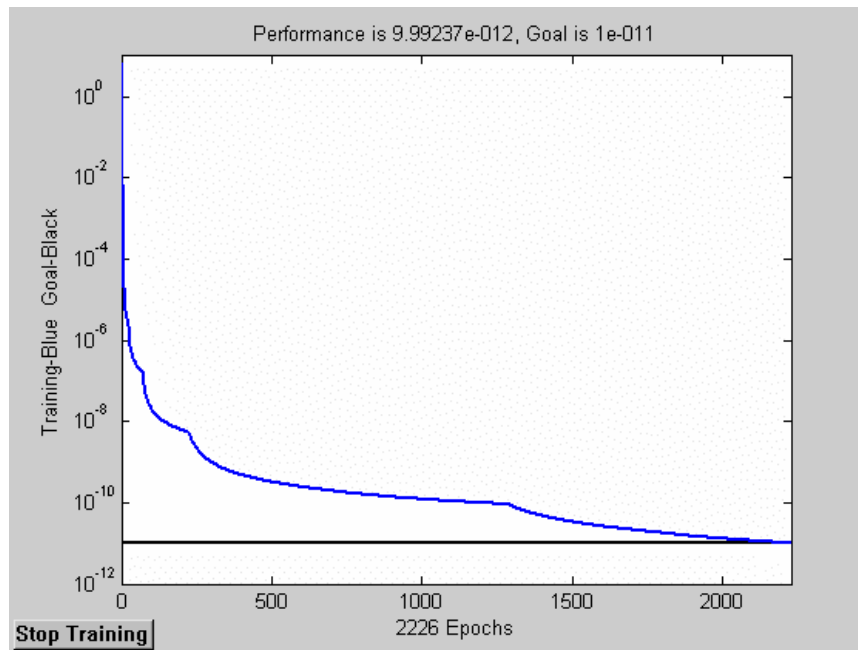


Figura 6.25 – Curva do erro do treino da rede neuronal para o critério de paragem de 10^{-11} (rede com uma camada escondida com 30 neurónios)

O aumento do número de neurónios na camada escondida de 20 para 30, para o critério de paragem 10^{-10} , reduziu o número de iterações, de 2002 para 1180, e o tempo aumentou de 140 para 187 minutos. Para o critério de paragem 10^{-11} , o número de iterações foi reduzido de 5854 para 2226 e o tempo diminuiu, de 410 para 371 minutos.

Nas figuras 6.26, 6.27, 6.28 e 6.29 apresentam-se os erros para o critério de paragem de 10^{-10} e 10^{-11} , respectivamente para o conjunto de treino e validação para a rede com 30 neurónios na camada escondida.

Os valores dos erros máximos percentuais, em módulo, são 0,53 e 0,44 % respectivamente para o treino e validação com o critério de paragem 10^{-10} e 0,21 e 0,20 % respectivamente para o treino e validação para critério de paragem 10^{-11} .

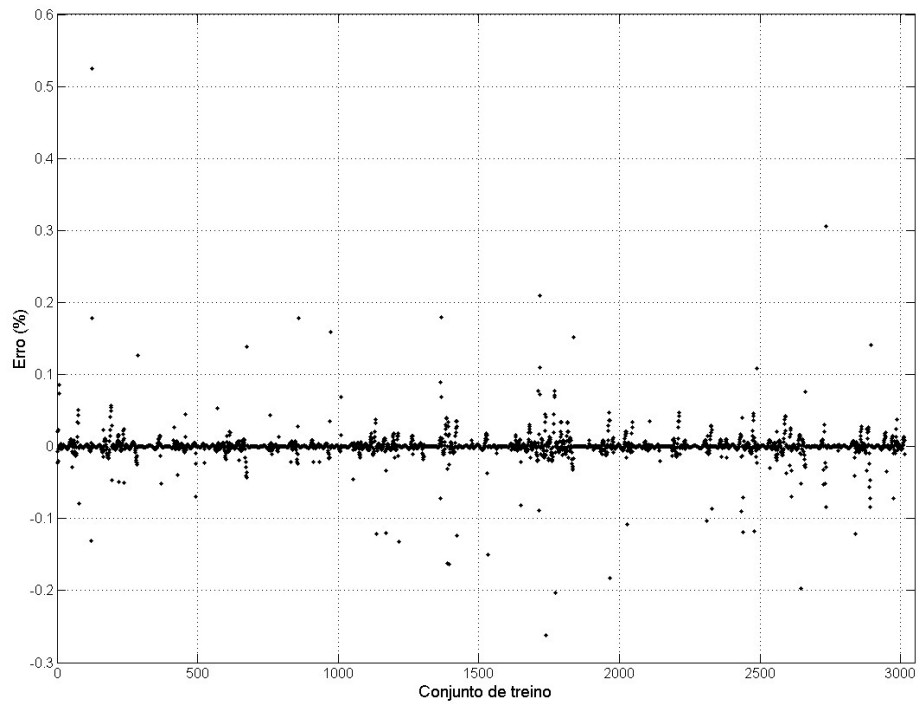


Figura 6.26 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de treino) e reais (rede com uma camada escondida com 30 neurónios e critério de paragem de 10^{-10})

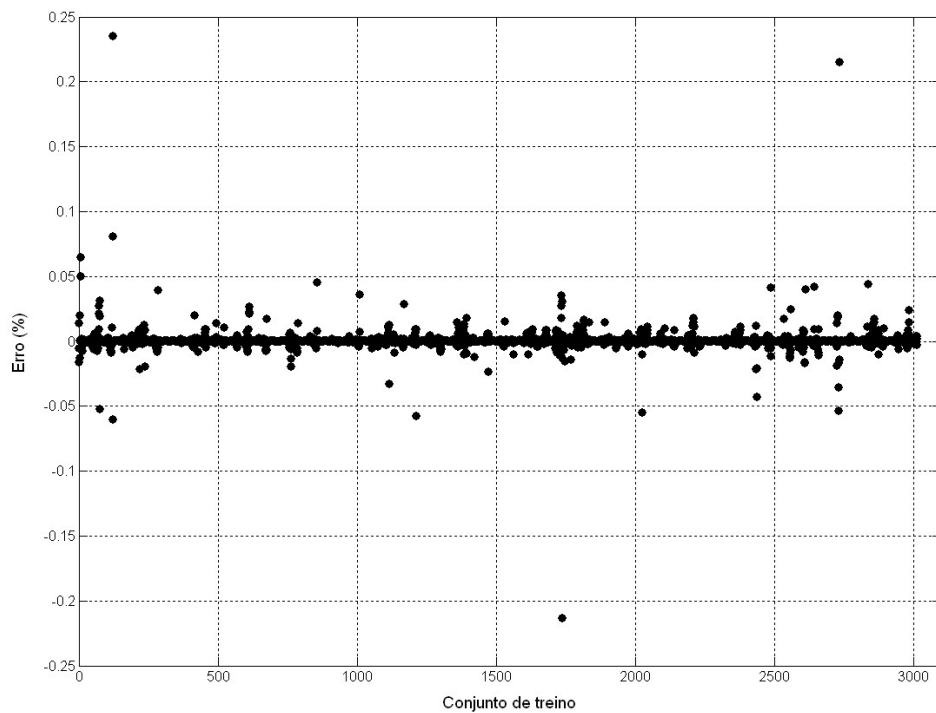


Figura 6.27 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de treino) e reais (rede com uma camada escondida com 30 neurónios e critério de paragem de 10^{-11})

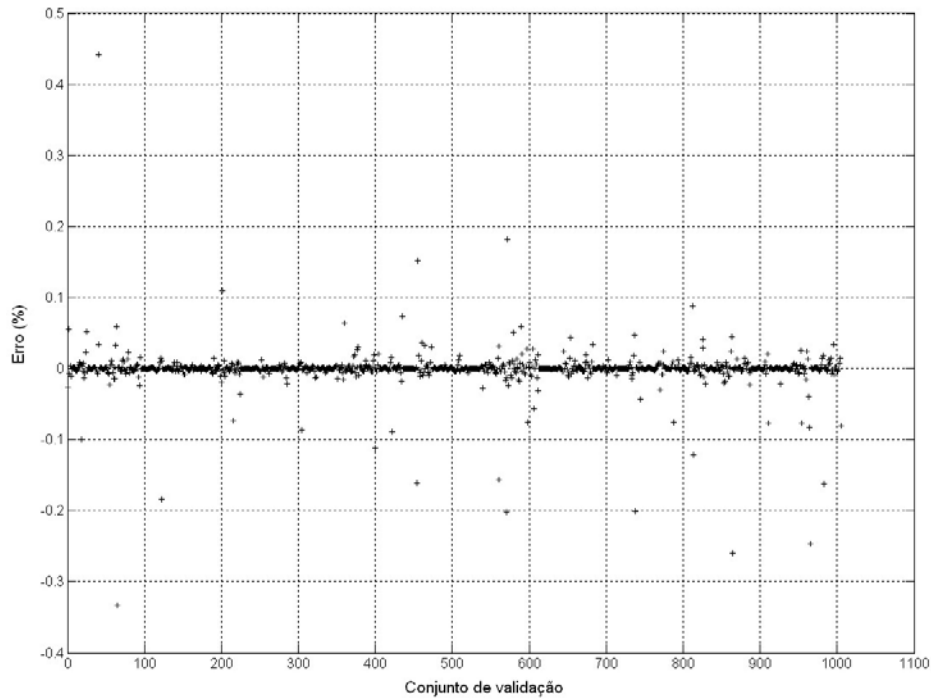


Figura 6.28 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de validação) e reais (rede com uma camada escondida com 30 neurónios e critério de paragem de 10^{-10})

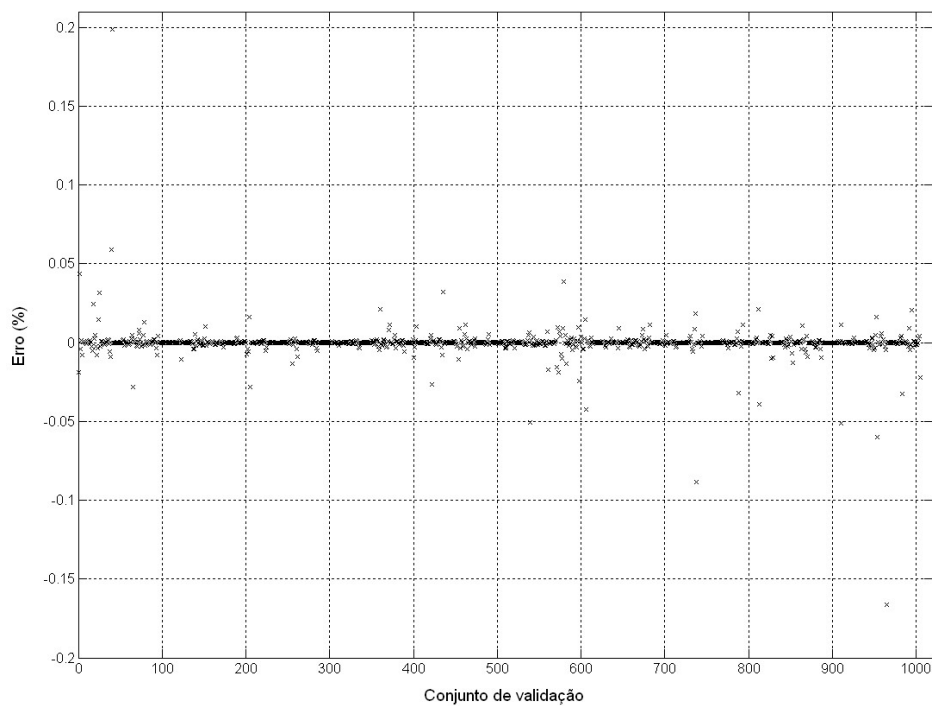


Figura 6.29 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de validação) e reais (rede com uma camada escondida com 30 neurónios e critério de paragem de 10^{-11})

Na tabela 6.3 apresenta-se a comparação dos resultados referentes às simulações realizadas com as RNA com 20 e 30 neurónios na camada escondida.

Tabela 6.3 – Comparação dos resultados referentes às simulações realizadas com as RNA com 20 e 30 neurónios na única camada escondida

Número de Neurónios (a)	Critério de paragem	Número de Iterações	Tempo do treino (min)	Número de Iterações /minuto	Módulo do Erro Máximo do Treino (%)	Módulo do Erro Máximo da Valid. (%)
20	10^{-10}	2002	140	14	0,46	0,32
20	10^{-11}	5854	410	14	0,13	0,11
30	10^{-10}	1180	187	6	0,53	0,44
30	10^{-11}	2226	371	6	0,21	0,20
NOTA: a) Na única camada escondida						

Com o aumento do número de neurónios na camada escondida para 30, o número de parâmetros livres aumenta para 1291 e, em consequência, o número de iterações por minuto desceu para 6, ver tabela 6.3. Na mesma tabela, pode-se verificar que o tempo necessário para convergir para o valor de erro de 10^{-10} , aumentou de 140 minutos para 187, mesmo tendo um menor número iterações necessários, que passou de 2002 para 1180. O aumento do tempo da simulação deveu-se ao menor número de iterações por minuto, ou seja, passou de 14 para 6 devido ao número de parâmetros livres ter aumentado.

Para o valor de erro de 10^{-11} , o tempo gasto na simulação baixou de 410 minutos para 371, mas devido a um menor número de iterações necessários, 5854 contra 2226 já que o número de iterações por minuto desceu, ver tabela 6.3.

Os erros para os mesmos valores de convergência aumentaram, invertendo uma tendência até aqui verificada.

6.2.2.4 – Aprendizagem da quarta rede neuronal

A quarta rede neuronal é igual às anteriores e unicamente difere no número de neurónios da camada escondida que passou a ser constituída por 41. Como se pretende avaliar em relação às melhores performances anteriores, o critério de paragem é fixado à partida no valor de 10^{-11} .

Na figura 6.30 apresenta-se a curva do erro do treino para o critério de paragem 10^{-11} , para a rede neuronal com 41 neurónios na camada escondida.

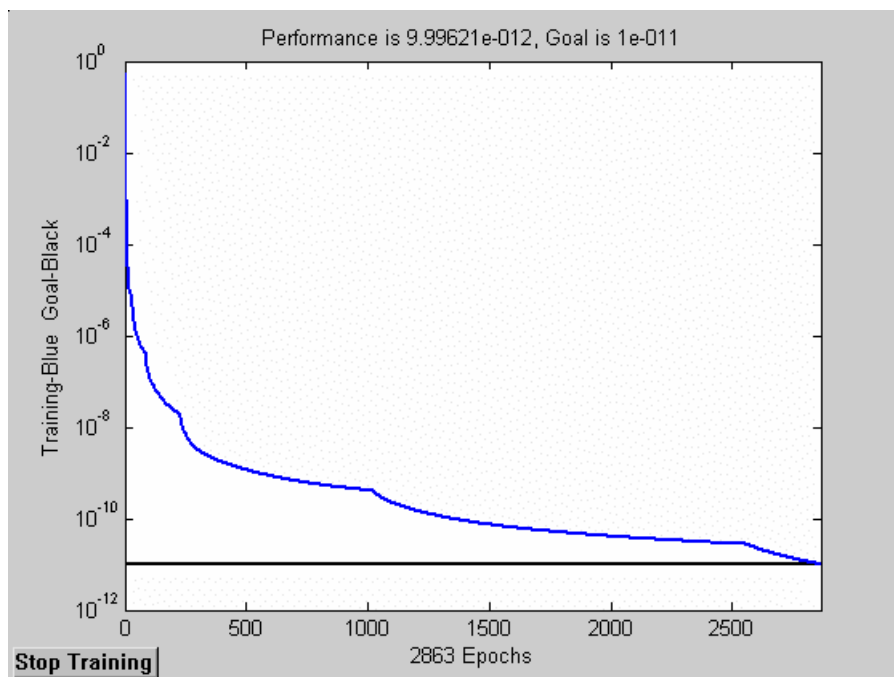


Figura 6.30 – Curva do erro do treino da rede neuronal para o critério de paragem de 10^{-11} (rede com uma camada escondida com 41 neurónios)

O aumento do número de neurónios na camada escondida de 30 para 41, e para o mesmo critério de paragem, contrariando a tendência até aqui verificada, o número de iterações aumentou, de 2226 para 2863, e o tempo também aumentou, de 371 para 859 minutos.

Nas figuras 6.31 e 6.32 apresentam-se os erros para o critério de paragem de 10^{-11} , respectivamente para o conjunto de treino e validação para a rede com 41 neurónios na camada escondida.

Os valores máximos dos erros, em módulo, são 0,07 e 0,01 % respectivamente para o treino e validação. Estes erros são os valores mais baixos encontrados nas várias simulações efectuadas com as quatro redes neuronais.

Na tabela 6.4 apresenta-se a comparação dos resultados referentes à simulação com a 4ª RNA com as outras RNA.

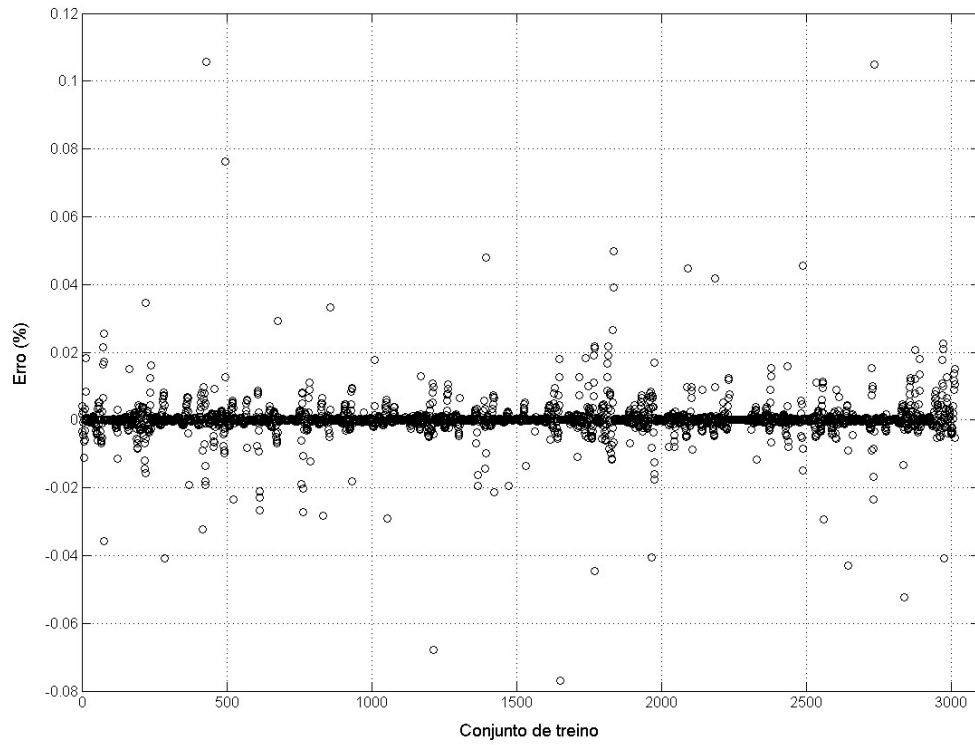


Figura 6.31 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de treino) e reais (rede com uma camada escondida com 41 neurónios e critério de paragem de 10^{-11})

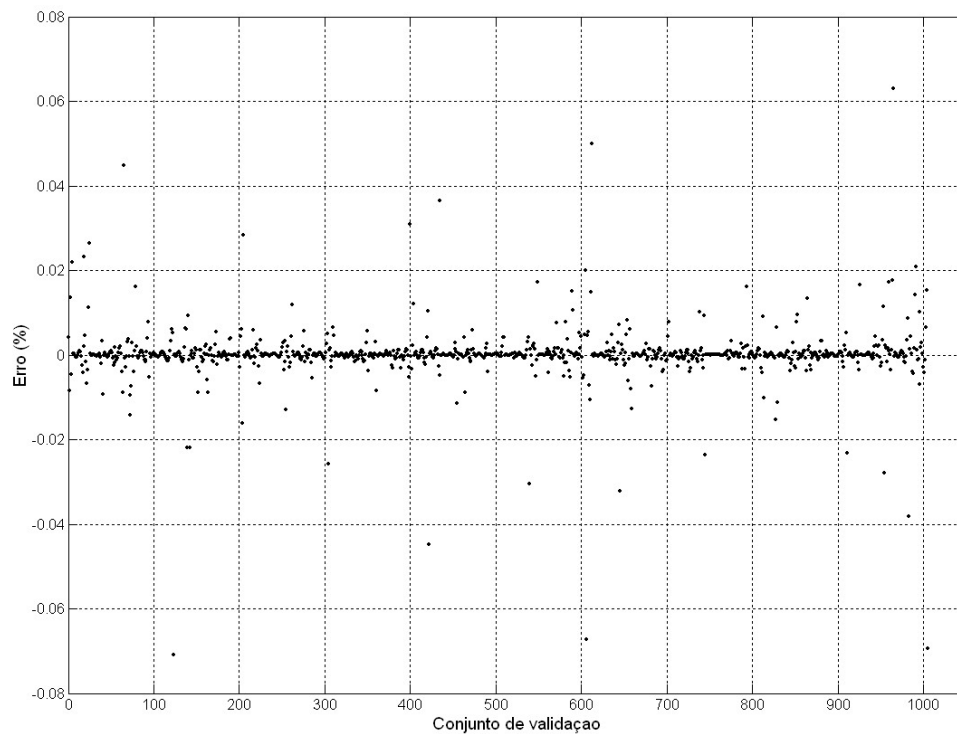


Figura 6.32 – Erros de comparação das distâncias ao colapso calculados pela rede neuronal (conjunto de validação) e reais (rede com uma camada escondida com 41 neurónios e critério de paragem de 10^{-11})

Tabela 6.4 – Comparação dos resultados referentes à simulação com a 4ª RNA com os melhores resultados das simulações com as outras RNA

Número de Neurónios (a)	Critério de paragem	Número de Iterações	Tempo do treino (min)	Número de Iterações /minuto	Módulo do Erro Máximo do Treino (%)	Módulo do Erro Máximo da Valid. (%)	Número de Parâmetros livres
10	10^{-10}	7412	159	47	0,34	0,61	431
20	10^{-11}	5854	410	14	0,13	0,11	861
30	10^{-11}	2226	371	6	0,21	0,20	1291
41	10^{-11}	2863	854	3	0,07	0,01	1764
NOTA: a) Na única camada escondida							

Analisando a tabela 6.4 concluiu-se que:

- o aumento do número de neurónios da RNA para 41, provocou o aumento dos parâmetros livres para 1769 e a redução do número de iterações por minuto;
- pela primeira vez, e para o mesmo critério de paragem, o aumento do número de neurónios na camada escondida provocou o aumento do número de iterações;
- o aumento do número de iterações provocou um aumento para mais do dobro do tempo da simulação, em relação ao melhor tempo conseguido anteriormente e para o mesmo critério de paragem;
- a única vantagem do aumento para 41 do número de neurónios foi a redução dos erros.

Com o objectivo de testar a aplicabilidade das RNA, no cálculo da distância ao colapso, foram realizadas simulações para comparar o tempo necessário de processamento para cada método. Na figura 6.33 apresentam-se as curvas de distância ao colapso em função do aumento da carga reactiva. A primeira curva foi calculada através de um FC contínuo e a segunda utilizando a rede neuronal com 41 neurónios na camada escondida.

Como se pode ver na figura 6.33, as curvas estão totalmente sobrepostas, sendo o erro desprezável. O tempo necessário para o cálculo foi de 90 segundos, com um FC contínuo, e de poucos segundos com a rede neuronal.

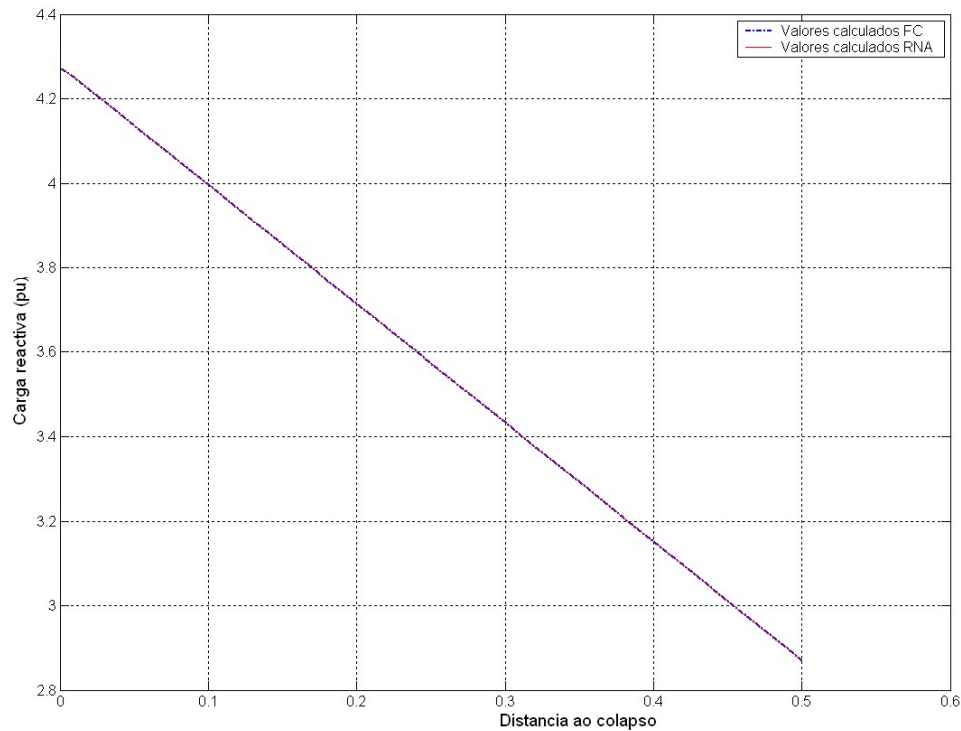


Figura 6.33 – Curvas da distância ao colapso em função da carga calculadas através de um FC contínuo e pela RNA

6.3 – CONCLUSÕES

A aplicação de uma RNA para o cálculo da distância ao colapso de tensão de um SEE, tornou-se à partida um desafio muito interessante.

A definição da informação para a aprendizagem de uma RNA foi o primeiro passo que se realizou, sendo um aspecto muito sensível, pois a informação a escolher deverá caracterizar o SEE em cada ponto de funcionamento, tendo em vista o objectivo que se pretende.

A normalização dos dados para a aprendizagem da RNA, necessária para ficarem de acordo com o intervalo usado na função de activação, é outro aspecto sensível, que caso não se faça provoca o aparecimento de resultados muito distantes dos que se pretendem obter.

Para a realização das simulações foi escolhida uma RNA do tipo PMC. As quatro RNA usadas nas simulações só diferiram no número de neurónios da camada escondida,

mantendo-se sempre uma única camada escondida. O objectivo das simulações com as quatro redes neuronais foi analisar a influência no erro, do aumento do número de neurónios na única camada escondida. Da análise dos resultados das simulações com as quatro RNA pode-se concluir que:

- o aumento do número de neurónios na camada escondida da RNA provocou um aumento do número de parâmetros livres. O aumento do número destes parâmetros provocou um aumento de tempo de cálculo e consequentemente uma redução do número de iterações por minuto;
- o aumento do número de neurónios da camada escondida da rede neuronal permitiu reduzir o valor do critério de paragem da função de erro. Esta redução era praticamente impossível efectuar na rede neuronal com 10 neurónios, pois na ultima simulação com esta RNA, o último troço final da curva de erro do treino era já um longo patamar, que indicava estar no limite de convergência;
- verifica-se que o aumento do número de neurónios permitiu, com menor número de iterações, atingir o mesmo valor da função de erro, com excepção para a rede com 41 neurónios que foi necessário mais iterações. A alteração do ponto da curva onde se verificava a paragem, permite indiciar que estas três últimas curvas ainda estão longe do limite de convergência, e possivelmente ainda se poderia tentar baixar mais o critério de paragem;
- o número de parâmetros livres aumentou, sucessivamente, com o aumento do número de neurónios, o que implicou um aumento do tempo por iteração e consequentemente a diminuição do número de iterações realizadas por minuto;
- os menores erros foram obtidos para a rede neuronal com 41 neurónios e o aumento do numero de neurónios de 20 para 30 não permitiu reduzir os erros;
- contrariamente às outras redes, com a 4ª RNA, o número de iterações e o tempo gasto na simulação piorou indiciando que há um limite para o número de neurónios para a camada escondida.

Os resultados obtidos com a aplicação de uma RNA, treinada, no cálculo da distância ao colapso de tensão, com a rede de 57 barramentos, permite concluir que os erros são baixos, e por isso desprezáveis. Nos cálculos efectuados, a RNA demorou poucos segundos, enquanto que com um FC contínuo, quase que chegou à centena de segundos. Esta diferença, de tempo, deverá aumentar para redes de maior dimensão.

Os resultados obtidos confirmam as RNA como um excelente método para ultrapassar as limitações apontadas aos FC contínuos. São rápidas, e por outro lado, o erro associado aos resultados são baixos, permitindo, assim, um óptimo apoio na gestão das redes eléctricas, em tempo real.

Capítulo 7

CONCLUSÕES

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

7.1 – Síntese do trabalho e conclusões

O trabalho de investigação, exposto nesta dissertação, teve como foco central o estudo da problemática da estabilidade de tensão em sistemas eléctricos.

No início estudaram-se os métodos de controlo de tensão dos sistemas eléctricos. Foi dada importância acrescida ao estudo do gerador síncrono, por ser o principal garante das tensões nas redes. Também se estudaram outros equipamentos que complementam o gerador síncrono no controlo da tensão. Todos estes componentes são imprescindíveis para manter os sistemas de energia num funcionamento estável e em caso de situação de instabilidade de tensão ainda com mais acuidade.

A instabilidade de tensão tem várias origens, pelo que a contínua monitorização dos sistemas eléctricos com a análise de índices ao colapso é fundamental para afastá-los da situação mais grave e penalizante que pode ocorrer, o colapso de tensão. A análise com índices ao colapso também é fundamental para definir medidas de controlo preventivo de instabilidade de tensão, evitando as situações extremas que podem desencadear uma actuação em cascata das protecções e provocar o apagão.

O estudo do apagão do dia 14 de Agosto de 2003, que ocorreu nos USA e Canadá, foi um complemento do estudo teórico realizado à estabilidade de tensão. A combinação de dois factores negativos está na origem de uma situação crítica de tensões baixas: a incapacidade de produção de energia reactiva e as cargas estarem anormalmente altas nesse dia. Uma

sequência de erros humanos, avarias de linhas e equipamentos vitais de supervisão e controlo, levaram o sistema para uma fragilização contínua até ao colapso. O colapso do sistema local arrastou outros sistemas adjacentes para a mesma situação.

Outros aspectos importantes a retirar deste estudo foram a importância da correcta manutenção dos componentes do sistema, neste caso concreto a limpeza de faixas das linhas aéreas. A falta de monitorização do sistema eléctrico com um índice ao colapso não permitiu a avaliação correcta das medidas correctivas necessárias para corrigir a situação de instabilidade de tensão que estavam a atravessar. A falta de um programa automático de deslastres não permitiu cortar a carga necessária para evitar o colapso do sistema eléctrico.

Com este estudo fica demonstrada a importância da existência de recursos de produção de energia reactiva para um correcto controlo da tensão evitando situações de instabilidade de tensão.

O estudo teórico das RNA foi importante para ultrapassar a abordagem de caixa preta, permitindo o uso deste tipo de ferramentas com a compreensão do seu funcionamento. O estudo dos aspectos fundamentais destas redes permitiu avançar e compreender as redes neuronais PMC, que foram aplicadas para o cálculo da distância ao colapso. Na prática, um obstáculo para o correcto funcionamento das RNA é o uso de PC com processamento em série. Fica assim anulada completamente a preciosa vantagem que estas redes têm de processamento paralelo.

O objectivo central da tese era a investigação na área da estabilidade de tensão. A descoberta da grandeza FSQV centralizou o foco da investigação, com a finalidade de aprofundar a sua análise. A investigação realizada teve como finalidade de descobrir a sua aplicabilidade e as possíveis aplicações na análise da estabilidade de tensão de uma rede eléctrica.

A aplicação às redes de teste dos algoritmos desenvolvidos, para analisar a grandeza FSQV, permitiu extrair um conjunto de conclusões que se referem em seguida:

1. o valor FSQV ao ser um somatório de $\delta Q/\delta V$ dependente do número de barramentos das redes de testes. Por isso cada rede de testes tem valores FSQV diferentes ao longo do processo de carregamento, tendo a rede de testes de 14 barramentos valores mais baixos, 255,72 (inicial) e 193,36 (final). A rede de 57 barramentos tem como valor inicial 1467,1 e como final 1213,8;
2. as curvas FSQV são diferentes para cada rede de testes. O seu andamento está associado aos limites de produção de energia reactiva dos geradores síncronos ou de outras fontes de energia reactiva;

3. o estudo do comportamento do FSQV, perante vários cenários de carga permitiu detectar o aspecto mais interessante desta grandeza. O valor FSQV do último FC antes do colapso não se alterou, nas simulações realizadas com a rede de testes de 57 barramentos, nos onze cenários de cargas definidos. Nos cenários que foram definidos, os dois barramentos com cargas reactivas mais pesadas e os seis barramentos mais críticos em termos de colapso de tensão, o factor de crescimento de cargas chega a ser triplo. Pretendeu-se assim criar os dois grupos de cargas mais penalizantes para o estudo que se pretendia realizar. Se os resultados com a rede de testes de 14 barramentos eram promissores, tendo um erro desprezável, os resultados das simulações com a rede de testes de 57 barramentos foram concludentes ao terem um erro nulo;
4. o erro nulo do valor FSQV, no último FC antes do colapso, nas simulações com a rede de 57 barramentos permitiu propor o um novo método FSQV, como novo método de detecção do ponto de colapso;
5. nos testes realizados, este novo método de detecção do colapso, demonstrou ser extremamente robusto. Para um desvio máximo de 2% da grandeza FSQV foi possível aumentar a carga de um único barramento de 18 a 1404 % e de 10 a 1579 % para a combinação de dois barramentos;
6. outra linha de investigação permitiu validar a aplicação do novo método FSQV no estudo de contingências de linhas, transformadores, geradores e baterias de condensadores, com um ou vários níveis. A análise do impacto no PMC dos vários tipos de contingências, com o método FSQV, foi realizada por simuladores que detectavam automaticamente o colapso;
7. o estudo de planeamento da expansão da produção de energia reactiva aplicando o novo método FSQV é outra interessante aplicação do novo método de estudos de estabilidade;
8. a possibilidade da detecção do colapso através da análise do valor FSQV permitiu definir um novo índice global de distância ao colapso NIVCP - ***New Index to Voltage Collapse Point***, para aplicação nos estudos de estabilidade.

Com a rede de testes de 57 barramentos obtiveram-se sempre resultados muito superiores, em relação à rede de 14 barramentos o que leva à conclusão que o novo método é mais estável para redes com maior dimensão.

A investigação realizada para justificar o erro zero do valor FSQV, no FC antes do colapso nas simulações com a rede de 57 barramentos, permitiu concluir o seguinte:

o erro nulo é devido à existência de erros muito baixos dos valores da diagonal da submatriz jacobiana J_{22} . O aumento da carga nos barramentos com situações extremas, cargas muito pesadas ou barramentos críticos, não têm influência nestes erros. O erro nulo é então uma característica desta grandeza FSQV.

As redes neuronais foram utilizadas para desenvolver uma ferramenta para a obtenção, de uma forma rápida e expedita, a distância ao colapso. Com uma RNA do tipo PMC foi possível obter a distância ao colapso de tensão, com um erro desprezável. Fica assim aberto caminho para que, em tempo real, se possa obter, uma ferramenta de apoio à gestão de sistemas eléctricos de energia.

7.2 – Perspectivas de desenvolvimentos futuros

O trabalho de investigação descrito nesta dissertação é um possível ponto de partida para o aprofundamento do estudo, da dimensão e das aplicações, de um novo método de avaliação da estabilidade de tensão de Sistemas Eléctricos de Energia. De uma forma genérica surgem as seguintes etapas de investigação:

1. confirmar os resultados obtidos com as duas redes de teste IEEE, com outras redes de teste de preferência com maiores dimensões;
2. confrontar os resultados obtidos pelo novo método FSQV com os resultados obtidos com outros métodos;
3. utilizar o novo método FSQV no estudo da estabilidade de uma rede real, por exemplo a rede de transporte portuguesa, confrontando os resultados obtidos com os resultados obtidos pelos métodos tradicionais;
4. a inclusão no novo método FSQV dos vários limites físicos dos componentes, como por exemplo, os limites máximos da intensidade de corrente nas linhas e a variação da tomada nos transformadores, aproximando o modelo matemático do sistema eléctrico do sistema real;
5. a inclusão, no novo método FSQV, do estudo de medidas preventivas face ao risco de colapso, assim como o estudo de medidas correctivas após contingências dos vários componentes;
6. o aprofundamento da aplicação do método FSQV aos estudos de planeamento da expansão da produção de energia reactiva;

-
7. incluir no conjunto de treino e teste criados para treinar a rede neuronal, os vários tipos de contingência, medidas correctivas de instabilidade de tensão e preventivas do colapso de tensão, aumentando a acção desta ferramenta rápida e expedita de apoio à gestão dos sistemas eléctricos de energia.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- [Ajj92] V. Ajarapu and C. Cristy, "*The Continuation Power Flow: A tool for steady state voltage stability analysis*," IEEE transactions on Power Systems, vol.7, pp. 416-423, February 1992
- [Ajj92a] V. Ajarapu, B. Lee, *Bifurcation Theory and its Application to Nonlinear Dynamical Phenomena in an Electrical Power System*, IEEE transactions on Power Systems, vol.7, N°1, February 1992
- [Aze92] Robert Azencott, *Simulated Annealing: Parallelization Techniques*, John Wiley & Sons, New York, 1992
- [Bar87] Fernando Maciel Barbosa, *Análise de Sistemas Eléctricos I*, FEUP 1987
- [Bis95] Chistopher M. Bishop, *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford University Press, Oxford 1995
- [Can92] C. A. Canizares e F. Alvarado, DeMarco, C.Dobson, I. Long, *Point of collapse methods applied to AC/DC power systems*, IEEE transactions on Power Systems, vol.7, N°2, May 1992
- [Can93] C. A. Canizares e F. L. Alvarado, *Point of collapse and continuation methods for large ac/dc systems*, IEEE transactions on Power Systems, vol.8, pp.1-8, February 1993
- [Can95] C. A. Canizares, *On Bifurcations, Voltage Collapse and Load Modeling*, IEEE transactions on Power Systems, vol.10, N°1, February 1995

- [Can96] C. A. Canizares, António Souza, Victor H. Quintana, *Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse*, IEEE transactions on Power Systems, vol.11, Nº3, August 1996
- [Can04] C. A. Canizares, *Linear Performance Indices to Predict Oscillatory Stability Problems in Power Systems*, IEEE transactions on Power Systems, vol. 19, Nº2, May 2004
- [Car03] B.A. Carreras, *Blackout Mitigation Assessment in Power Transmission Systems*, <http://eceserv0.ece.wisc.edu/~dobson/PAPERS/publications.html>
- [Cut00] Thierry V. Cutsem, *Voltage Instability: Phenomena, Countermeasures, and Analysis Methods*, Proceedings of the IEEE, vol. 88, Nº2, February 2000
- [Cig92] *Modelling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena*, CIGRE report prepared by CIGRE TF 38.02.10, 1992
- [Cig94] *Indices Predicting Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena*, CIGRE report prepared by CIGRE TF 38.02.11, 1994
- [Cig95] *Criteria and Countermeasures for Voltage Collapse*, CIGRE report prepared by CIGRE TF 38.02.12, 1995
- [Cor02] Paulo Alexandre Ribeiro Cortez, *Modelos Inspirados na Natureza para a Previsão de Séries Temporais*, Tese de Doutorado, UM, 2002
- [Dem04] Howard Demuth and Mark Beale, *Neural Network Toolbox*, www.mathworks.com, 2004
- [Dob02] Ian Dobson, *An Initial complex systems analysis of risk of blackouts in power transmission systems*, <http://eceserv0.ece.wisc.edu/~dobson/PAPERS/publications.html>
- [Dob03] Ian Dobson, *A probabilistic-depend model of cascading failure and possible implications for blackouts*, <http://eceserv0.ece.wisc.edu/~dobson/PAPERS/publications.html>

- [DyL67] T. E. Dy Liacco, *The Adaptive Reliability Control System*, IEEE transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-86, Nº. 5, May 1967
- [EDP04] WWW.edp.pt
- [Erw99] Erwin Kreyszig, *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons, New York, 1999
- [Fer99] José Rui Ferreira, *Avaliação da Estabilidade de Tensão com Cenários de Injecção Imprecisos e Identificação de Procedimentos de Controlo*, Tese de Doutoramento, FEUP, 1999
- [Fern01] Fernando Manuel Domingues Fernandes, *Contribuição para a Avaliação em tempo Real da Estabilidade de Tensão num Sistema Eléctrico de Energia*, Tese de Doutoramento, FEUP, 2001
- [Fid95] José Nuno Fidalgo, *Sistemas Isolados com Produção Eólica: Controlo e Segurança com Redes Neurais*, Tese de Doutoramento, FEUP, 1995
- [Fre94] James A. Freeman, *Simulating Neural Networks with Mathematica*, 1994
- [Gra94] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, New York, 1994
- [Hag99] Martin T. Hagan, *Neural Networks Design*, PWS Publishing Company, Boston, 1999
- [Hay99] Simon Haykin, *Neural Networks – A comprehensive foundation*, Prentice Hall, New Jersey, 1999
- [Hua02] Gang. M. Huang, *Detection of Dynamic Voltage Collapse*, IEEE 2002
- [Kes86] P. Kessel, H. Glavitsch, *Estimating the Voltage Stability of a Power System*, IEEE transactions on Power Systems, vol.1 PWRD-1, Nº 3, July 1986
- [Kun94] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw Hill Publishing Company, New York, 1994

- [Kun04] P. Kundur, *Definition and Classification of Power System Stability*, IEEE/Cigre Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, IEEE transactions on Power Systems, vol.19, Nº 2, May 2004
- [Laa92] P. J. M. Van Laarhoven and E. H. L. Aarts, *Simulated Annealing: Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1992
- [Lem90] C. Lemaître, J. P. Paul; J. M. Tesserou, Y. Harmand, Y. S. Zhao, *An indicator of the risk of voltage profile instability for real-time control applications*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, Nº 1, February 1990
- [Lof92] P-A Löf, T. Smed, G. Andersson, D. J. Hill, *Fast calculation of a voltage stability index*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, Nº 1, February 1992
- [Lof93] P-A Löf, G. Andersson, D. J. Hill, *Voltage stability indices for stressed power systems*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, Nº 1, February 1993
- [Lop90] Peças Lopes, J.A., Cidras, J. Martinez, Maciel Barbosa, *Avaliação da Segurança de Sistemas de Energia Eléctrica: Definições e Métodos*, 1.^{as} Jornadas Hispano-Lusas de Engenharia Eléctrica, Vigo; Julho 1990
- [Lop91] Peças Lopes, F. M. Domingues Fernandes, Maciel Barbosa, *Indicadores de Risco de Instabilidade de Tensão num Sistema Eléctrico de Energia*, 2.^{as} Jornadas Hispano-Lusas de Engenharia Eléctrica, 1991
- [Ner04] Nerc, *Technical Analysis of the August 14, 2003, Blackout: What Happened, Why, and What Did We Learn?*, www.nerc.com/~filez/blackout.html
- [Orv96] William J. Orvis, *Excel for Scientists and Engineers*, Sibex, San Francisco, 1996
- [Orve98] Thomas J. Overbye, *Determination of Emergency Power System Voltage Control Actions*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 13, Nº 1, February 1998
- [Pes02] IEEE/PES Power System Stability Subcommittee Special Publication, "Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools," Final document, August 2002

- [Pse04] <http://pserc.org/Resources.htm#Blackout%20Reports> ou
<https://reports.energy.gov/BlackoutFinal-Web.pdf>
- [Ren03] www.ren.pt
- [Rep04] U.S.-Canada Power System Outage Task Force, *Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations*,
<https://reports.energy.gov/BlackoutFinal-Web.pdf>
- [Sa01] J.P.Marques de Sá, *Pattern Recognition – Concepts, Methods and Applications*,
Spring-Verlag, Berlin, 2001
- [Tir88] A. Tiranuchit, R. J. Thomas, *A posturing strategy against voltage instabilities in electric power systems*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 3, N° 1,
February 1988
- [Var00] Luis S. Vargas, *Time Dependence of Controls to Avoid Voltage Collapse*, IEEE
Transactions on Power Systems, vol. 15, N° 4, November 2000
- [Was] www.ee.washington.edu/research/pstca/
- [Weh98] Louis A. Wehenkel, *Automatic Learning Techniques in Power Systems*, Kluwer
Academic Publishers, Boston, 1998

Anexo A

DADOS E RESULTADOS DAS REDES DE TESTES

ANEXO A

DADOS E RESULTADOS DAS REDES DE TESTE

Neste anexo são apresentados os dados, parâmetros das linhas e os resultados dos fluxos de cargas, para as redes de teste de 14 e 57 barramentos do IEEE.

A.1 – REDE DE TESTE DE 14 BARRAMENTOS DO IEEE

Na tabela A1 apresentam-se os dados relativos aos barramentos e os resultados do FC utilizando o software FCNR, que será apresentado no anexo B, para a rede de testes de 14 barramentos do IEEE.

Na tabela A2, são apresentados os parâmetros das linhas modelizadas através de um esquema equivalente em π , para a rede de teste de 14 barramentos do IEEE.

Tabela A1 – Dados e resultados do FC da rede de 14 barramentos do IEEE

Barramento		Tensão Barramento		Produção		Cargas	
Número	Tipo	Módulo (pu)	Fase (rad)	Pot. Act. (pu)	Pot. React. (pu)	Pot. Act. (pu)	Pot. React. (pu)
1	Ref.	1,060	0,000	2,32	0,000	0,000	0,000
2	PV	1,045	-0,087	0,40	0,436	0,217	0,127
3	PV	1,010	-0,222	0,00	0,251	0,942	0,19
4	PQ	1,018	-0,180			0,478	-0,039
5	PQ	1,020	-0,153			0,076	0,016

Barramento		Tensão Barramento		Produção		Cargas	
Número	Tipo	Módulo (pu)	Fase (rad)	Pot. Act. (pu)	Pot. React. (pu)	Pot. Act. (pu)	Pot. React. (pu)
6	PV	1,070	-0,248	0,00	0,127	0,112	0,075
7	PQ	1,062	-0,233			0,000	0,000
8	PV	1,090	-0,233	0,00	0,176	0,000	0,000
9	PQ	1,056	-0,261			0,295	0,166
10	PQ	1,051	-0,264			0,090	0,058
11	PQ	1,057	-0,258			0,035	0,018
12	PQ	1,055	-0,263			0,061	0,016
13	PQ	1,050	-0,265			0,135	0,058
14	PQ	1,036	-0,280			0,149	0,050
1) Potência de base de 100 MVA 2) O barramento 9 tem um <i>shunt</i> capacitivo de 0,190 pu							

Tabela A2 – Dados das linhas da rede de 14 barramentos do IEEE

Linha/Transformador			Resist_ ência (pu)	React_ ância (pu)	Suscept_ ância (pu)	Razão de transf_ormação
Número	Barram_ento (i)	Barram_ento (j)				
1	1	2	0,01938	0,05917	0,0528	0
2	1	5	0,05403	0,22304	0,0492	0
3	2	3	0,04699	0,19797	0,0438	0
4	2	4	0,05811	0,17632	0,0340	0
5	2	5	0,05695	0,17388	0,0346	0
6	3	4	0,06701	0,17103	0,0128	0
7	4	5	0,01335	0,04211	0	0
8	4	7	0	0,20912	0	0,978
9	4	9	0	0,55618	0	0,969
10	5	6	0	0,25202	0	0,932
11	6	11	0,09498	0,19890	0	0
12	6	12	0,12291	0,25581	0	0
13	6	13	0,06615	0,13027	0	0
14	7	8	0	0,17615	0	0
15	7	9	0	0,11001	0	0
16	9	10	0,03181	0,08450	0	0
17	9	14	0,12711	0,27038	0	0
18	10	11	0,08205	0,19207	0	0
19	12	13	0,22092	0,19988	0	0
20	13	14	0,17093	0,34802	0	0
Potência de base de 100 MVA						

A.2 – REDE DE TESTE DE 57 BARRAMENTOS DO IEEE

Na tabela A3 apresentam-se os dados relativos aos barramentos e os resultados do fluxo de cargas utilizando o *software* FCNR, para a rede de testes de 57 barramentos do IEEE.

Tabela A3 – Dados e resultados do fluxo de cargas da rede de 57 barramentos

Barramento		Tensão Barramento		Produção		Cargas	
Número	Tipo	Módulo (pu)	Fase (rad)	Pot. Act. (pu)	Pot. React. (pu)	Pot. Act. (pu)	Pot. React. (pu)
1	Ref	1,040	0,000	4,7865	1,2885	0,550	0,170
2	PV	1,010	-0,063	0,0000	-0,0076	0,030	0,880
3	PV	0,985	-0,304	0,4000	-0,0091	0,410	0,210
4	PQ	0,981	-0,385			0,000	0,000
5	PQ	0,977	-0,491			0,130	0,040
6	PV	0,980	-0,528	0,0000	0,0087	0,750	0,020
7	PQ	0,984	-0,545			0,000	0,000
8	PV	1,005	-0,490	4,5000	0,6210	1,500	0,220
9	PV	0,980	-0,576	0,0000	0,0229	1,210	0,260
10	PQ	0,986	-0,589			0,050	0,020
11	PQ	0,974	-0,545			0,000	0,000
12	PV	1,015	-0,530	3,1000	1,2863	3,770	0,240
13	PQ	0,979	-0,489			0,180	0,023
14	PQ	0,970	-0,444			0,105	0,053
15	PQ	0,988	-0,334			0,220	0,050
16	PQ	1,013	-0,406			0,430	0,030
17	PQ	1,018	-0,218			0,420	0,080
18	PQ	1,001	-0,534			0,272	0,098
19	PQ	0,970	-0,590			0,033	0,006
20	PQ	0,964	-0,601			0,023	0,010
21	PQ	1,009	-0,593			0,000	0,000
22	PQ	1,010	-0,591			0,000	0,000
23	PQ	1,008	-0,596			0,063	0,021
24	PQ	0,999	-0,642			0,000	0,000
25	PQ	0,983	-0,897			0,063	0,032
26	PQ	0,959	-0,635			0,000	0,000
27	PQ	0,982	-0,641			0,093	0,005
28	PQ	0,997	-0,624			0,046	0,023
29	PQ	1,010	-0,613			0,170	0,026
30	PQ	0,963	-0,930			0,036	0,018
31	PQ	0,936	-0,976			0,058	0,029
32	PQ	0,950	-0,912			0,016	0,008
33	PQ	0,948	-0,914			0,038	0,019

Barramento		Tensão Barramento		Produção		Cargas	
Número	Tipo	Módulo (pu)	Fase (rad)	Pot. Act. (pu)	Pot. React. (pu)	Pot. Act. (pu)	Pot. React. (pu)
34	PQ	0,959	-0,641			0,000	0,000
35	PQ	0,966	-0,633			0,060	0,030
36	PQ	0,976	-0,623			0,000	0,000
37	PQ	0,985	-0,615			0,000	0,000
38	PQ	1,013	-0,582			0,140	0,070
39	PQ	0,983	-0,617			0,000	0,000
40	PQ	0,973	-0,627			0,000	0,000
41	PQ	0,996	-0,692			0,063	0,030
42	PQ	0,967	-0,741			0,071	0,044
43	PQ	1,010	-0,587			0,020	0,010
44	PQ	1,017	-0,539			0,120	0,018
45	PQ	1,036	-0,428			0,000	0,000
46	PQ	1,060	-0,512			0,000	0,000
47	PQ	1,033	-0,570			0,297	0,116
48	PQ	1,027	-0,576			0,000	0,000
49	PQ	1,036	-0,597			0,180	0,085
50	PQ	1,023	-0,632			0,210	0,105
51	PQ	1,052	-0,624			0,180	0,053
52	PQ	0,980	-0,661			0,049	0,022
53	PQ	0,971	-0,682			0,200	0,100
54	PQ	0,996	-0,656			0,041	0,014
55	PQ	1,031	-0,619			0,068	0,034
56	PQ	0,968	-0,751			0,076	0,022
57	PQ	0,965	-0,768			0,067	0,020
1) Potência de base de 100 MVA 2) O barramento 18 tem um <i>shunt</i> capacitivo de 0,1 pu; O barramento 25 tem um <i>shunt</i> capacitivo de 0,059 pu; O barramento 53 tem um <i>shunt</i> capacitivo de 0,063 pu							

Na tabela A4 apresentam-se os parâmetros das linhas modelizadas através de um esquema equivalente em π para a rede de teste de 57 barramentos do IEEE.

Tabela A4 – Dados das linhas da rede de 57 barramentos do IEEE

Linha/Transformador			Resist_ ência (pu)	React_ ância (pu)	Suscept_ ância (pu)	Razão de transf_ormação
Número	Barram_ento (i)	Barram_ento (j)				
1	1	2	0,0083	0,028	0,129	0
2	2	3	0,0298	0,085	0,0818	0
3	3	4	0,0112	0,0366	0,038	0
4	4	5	0,0625	0,132	0,0258	0
5	4	6	0,043	0,148	0,0348	0
6	6	7	0,02	0,102	0,0276	0
7	6	8	0,0339	0,173	0,047	0
8	8	9	0,0099	0,0505	0,0548	0
9	9	10	0,0369	0,1679	0,044	0
10	9	11	0,0258	0,0848	0,0218	0
11	9	12	0,0648	0,295	0,0772	0
12	9	13	0,0481	0,158	0,0406	0
13	13	14	0,0132	0,0434	0,011	0
14	13	15	0,0269	0,0869	0,023	0
15	1	15	0,0178	0,091	0,0988	0
16	1	16	0,0454	0,206	0,0546	0
17	1	17	0,0238	0,108	0,0286	0
18	3	15	0,0162	0,053	0,0544	0
19	4	18	0	0,555	0	0,97
20	4	18	0	0,43	0	0,978
21	5	6	0,0302	0,0641	0,0124	0
22	7	8	0,0139	0,0712	0,0194	0
23	10	12	0,0277	0,1262	0,0328	0
24	11	13	0,0223	0,0732	0,0188	0
25	12	13	0,0178	0,058	0,0604	0
26	12	16	0,018	0,0813	0,0216	0
27	12	17	0,0397	0,179	0,0476	0
28	14	15	0,0171	0,0547	0,0148	0
29	18	19	0,461	0,685	0	0
30	19	20	0,283	0,434	0	0
31	21	20	0	0,7767	0	1,043
32	21	22	0,0736	0,117	0	0
33	22	23	0,0099	0,0152	0	0
34	23	24	0,166	0,256	0,0084	0
35	24	25	0	1,182	0	1
36	24	25	0	1,23	0	1
37	24	26	0	0,0473	0	1,043
38	26	27	0,165	0,254	0	0
39	27	28	0,0618	0,0954	0	0
40	28	29	0,0418	0,0587	0	0
41	7	29	0	0,0648	0	0,967
42	25	30	0,135	0,202	0	0
43	30	31	0,326	0,497	0	0
44	31	32	0,507	0,755	0	0

Linha/Transformador			Resist_ ência (pu)	React_ ância (pu)	Suscept_ ância (pu)	Razão de transf_ormação
Número	Barram_ento (i)	Barram_ento (j)				
45	32	33	0,0392	0,036	0	0
46	34	32	0	0,953	0	0,975
47	34	35	0,052	0,078	0,0032	0
48	35	36	0,043	0,0537	0,0016	0
49	36	37	0,029	0,0366	0	0
50	37	38	0,0651	0,1009	0,002	0
51	37	39	0,0239	0,0379	0	0
52	36	40	0,03	0,0466	0	0
53	22	38	0,0192	0,0295	0	0
54	11	41	0	0,749	0	0,955
55	41	42	0,207	0,352	0	0
56	41	43	0	0,412	0	0
57	38	44	0,0289	0,0585	0,002	0
58	15	45	0	0,1042	0	0,955
59	14	46	0	0,0735	0	0,9
60	46	47	0,023	0,068	0,0032	0
61	47	48	0,0182	0,0233	0	0
62	48	49	0,0834	0,129	0,0048	0
63	49	50	0,0801	0,128	0	0
64	50	51	0,1386	0,22	0	0
65	10	51	0	0,0712	0	0,93
66	13	49	0	0,191	0	0,895
67	29	52	0,1442	0,187	0	0
68	52	53	0,0762	0,0984	0	0
69	53	54	0,1878	0,232	0	0
70	54	55	0,1732	0,2265	0	0
71	11	43	0	0,153	0	0,958
72	44	45	0,0624	0,1242	0,004	0
73	40	56	0	1,195	0	0,958
74	56	41	0,553	0,549	0	0
75	56	42	0,2125	0,354	0	0
76	39	57	0	1,355	0	0,98
77	57	56	0,174	0,26	0	0
78	38	49	0,115	0,177	0,003	0
79	38	48	0,0312	0,0482	0	0
80	9	55	0	0,1205	0	0,94
Potência de base de 100 MVA						

Anexo B

O PROGRAMA FCNR

ANEXO B

O PROGRAMA FCNR

Neste anexo é apresentado o software FCNR, assim como a validação dos seus resultados obtidos nos FC. A validação dos resultados foi realizada por comparação com os resultados obtidos com o software de referência Power World, para as redes de teste de 14 e 57 barramentos, definindo sempre as mesmas condições de partida para os FC.

B1 – As motivações para o desenvolvimento de software em Matlab

Inicialmente, o software escolhido para a realização de simulações com as redes foi o Power World. Sendo um software de referência na área de sistemas de energia, os seus resultados têm à partida garantia de fiabilidade e rapidez no seu cálculo.

Na investigação que se realizou na área da estabilidade de tensão, foi sempre necessário implementar algoritmos de testes, através de rotinas desenvolvidas para o efeito. Estas rotinas apoiaram-se sempre num programa que realiza FC. É o caso da rotina que realiza o FC contínuo, que por aumentos sucessivos da carga dos barramentos leva a rede de testes ao colapso. Um software fechado como o Power World, não tem a possibilidade de desenvolver este tipo de rotinas.

O desenvolvimento de um software em Matlab foi a solução encontrada para ultrapassar as limitações apontadas ao Power World. O software desenvolvido realiza o FC pelo método

Newton-Raphson, sendo por isso chamado FCNR – Fluxos de Carga pelo método Newton-Raphson.

As diversas rotinas desenvolvidas e inclusivamente simuladores de contingências para análise de estabilidade de tensão, tiveram sempre como peça central o programa FCNR.

Este trabalho foi recompensado pela possibilidade de ter um FC completamente aberto e desenvolvido em módulos. Em fases avançadas da investigação, tornou-se uma ferramenta poderosa e imprescindível, para atingir os objectivos pretendidos. Ao ser um software aberto, permitiu com facilidade a implementação de algoritmos, como também a recolha de toda a informação sobre os FC, para o seu posterior tratamento, como ficou demonstrado ao longo deste trabalho de investigação.

B.2 – O programa FCNR

O programa FCNR é constituído por 14 rotinas com as seguintes funções:

- **tipo_bus** – rotina que a partir da informação sobre o tipo de barramento (com/sem produção activa e reactiva), caracteriza os barramentos entre PV e PQ;
- **cal_Y** – rotina que a partir dos dados da rede constrói a matriz das admitâncias, conductâncias e susceptâncias das linhas;
- **cal_Yii** – rotina que a partir da a matriz das admitâncias, conductâncias e susceptâncias das linhas constrói a matriz das admitâncias próprias dos barramentos;
- **derivadas** – rotina que calcula as derivadas necessárias para a construção da matriz jacobiana total;
- **cal_J11** – rotina que calcula os elementos da submatriz jacobiana J11;
- **cal_J21** – rotina que calcula os elementos da submatriz jacobiana J21;
- **cal_J12** – rotina que calcula os elementos da submatriz jacobiana J12;

- **cal_J22** – rotina que calcula os elementos da submatriz jacobiana J22;
- **cal_var_PiQi** – rotina que calcula as potências activas e reactivas injectadas nos barramentos e os desvios de potência activa ΔP_i e reactiva ΔQ_i ;
- **cal_var_FCNR** – rotina que calcula o vector com as variações das potências activas e reactivas injectadas nos barramentos para a realização do fluxo de cargas;
- **cal_J_FCNR** – rotina que a partir do jacobiano total constrói a matriz jacobiana para o fluxo de cargas;
- **cal_res_FCNR** – rotina que realiza o FC e calcula os resultados, incrementos das tensões em fase $\Delta \theta$ e em módulo ΔV , de uma iteração do fluxo de cargas;
- **cal_J** – rotina que chama as rotinas anteriores e efectua uma iteração do fluxo de cargas;
- **FCNR** – rotina que chama a rotina cal_J para realizar uma iteração e controla o número de iterações do fluxo de cargas pela análise do critério de paragem.

Na tabela B1 são apresentados os dados de entrada e de saída, das rotinas do programa FCNR.

Na figura B1 apresenta-se o fluxograma do programa FCNR.

B.3 – Validação dos resultados do programa FCNR

Após o desenvolvimento do programa FCNR tornou-se imprescindível a validação dos seus resultados. Para ser possível a realização dessa tarefa, foram realizadas as mesmas simulações com as mesmas condições de partida, utilizando o programa FCNR e o Power Word. Nas simulações realizadas foram utilizadas as redes de testes de 14 e 57 barramentos do IEEE.

Tabela B1 – Dados de entrada e saída das rotinas do programa FCNR

Nome da rotina	Dados de entrada	Dados de saída
tipo_bus.m	Matriz mat_bus	Matriz Tipo_bus (matriz com o tipo de bus)
cal_Y.m	Matriz car_li (características das LI)	Matriz mat_Y (matriz com admitâncias das LI)
cal_Yii.m	Matriz mat_Y (matriz com admitâncias das LI)	Matriz mat_Yii (matriz com admitâncias próprias dos barramentos)
derivadas.m	Matriz mat_Y Matriz mat_bus	Matriz deriv_J11 e deriv_J12 (matrizes com as derivadas parciais das submatrizes jacobianas J11 e J21)
cal_J11.m	Matriz deriv_J11	Matriz mat_J11.m (sub-matriz jacobiana J11)
cal_J21.m	Matriz deriv_J21	Matriz mat_J21.m (sub-matriz jacobiana J21)
cal_J12.m	Matriz mat_J21 Matriz mat_bus Matriz mat_Y	Matriz deriv_J12 (matriz com as derivadas parciais da submatriz Jacobiana J12) Matriz mat_Gii (matriz com as conductâncias próprias do barramento)
cal_J22.m	Matriz mat_J21 Matriz mat_bus Matriz mat_Y	Matriz deriv_J22 (matriz com as derivadas parciais da submatriz Jacobiana J22) Matriz mat_Bii (matriz com as susceptâncias próprias do barramento)
cal_var_PiQi.m	Matriz mat_bus Matriz mat_Gii Matriz mat_Bii	Matriz mat_Pi e mat_Qi (matrizes com os Pi e Qi) Matriz mat_var_Pi e mat_var_Qi (com as variações de Pi e Qi) Matriz mat_var_Pi_evo e mat_var_Qi_evo (com as variações de Pi e Qi nas varias iterações)
cal_var_FCNR.m	Matriz mat_var_Pi Matriz mat_var_Qi	mat_var_FCNR (matriz com as variações de Pi e Qi para o FCNR)
Cal_J_FCNR.m	Matriz mat_J11 Matriz mat_J12 Matriz mat_J21 Matriz mat_J22	Matriz mat_JNR (matriz jacobiana para o FCNR)
cal_J.m	Tem que correr antes: cal_Y.m derivadas.m cal_J11.m, cal_J21.m, cal_J12.m, cal_J22.m cal_var_PiQi.m cal_J_FCNR.m cal_var_FCNR.m cal_res_FCNR.m	Só faz uma iteração do FC
cal_res_FCNR.m	mat_JNR mat_var_FCNR	Faz o FC invertendo a matriz jacobiana e calculando os incrementos de V (argumento e fase) Calcula os novos valores de V (argumento e fase)
FCNR.m	Chama a rotina cal_J.m para realizar uma iteração Controla a convergência através do critério de paragem.	

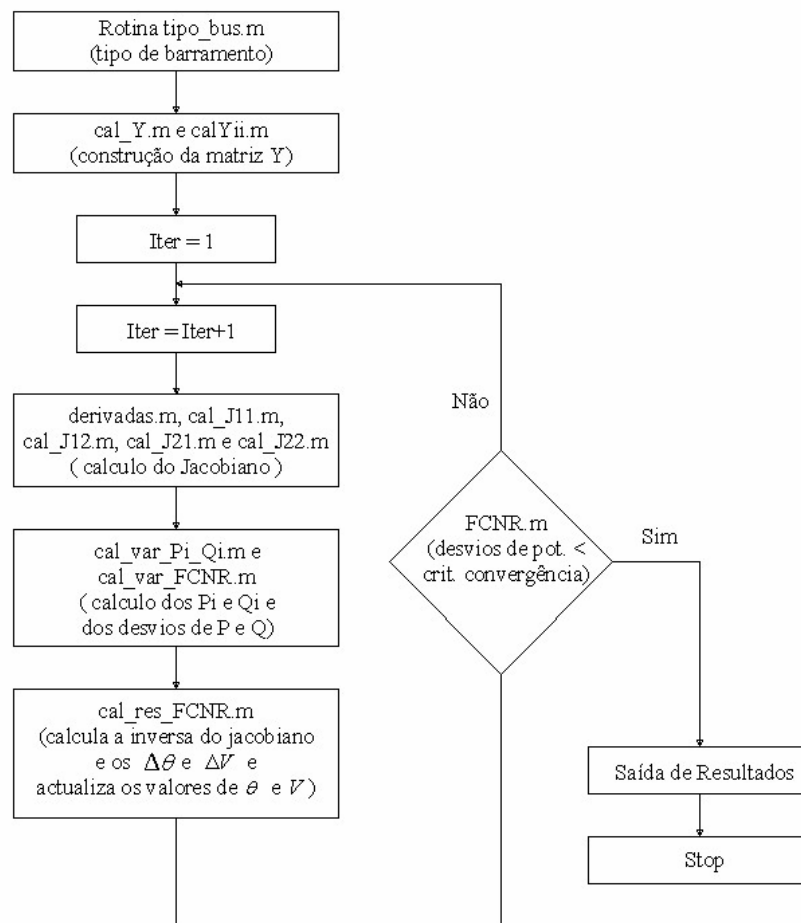


Figura B1 – Fluxograma do programa FCNR

Na tabela B2 são apresentados os erros máximos da comparação dos resultados dos FC obtidos com o programa FCNR e com o Power World.

Na tabela B3 a B6 são apresentados os erros da comparação dos resultados dos FC realizados com o software FCNR e com o Power World, para as redes de teste de 14 e 57 barramentos.

Tabela B2 – Erros máximos da comparação dos resultados do FC obtidos entre o programa FCNR e o Power World para a rede 14 e 57 barramentos

Rede IEEE	Grandeza	Erro máximo (%)
14 Barramentos	Tensão (módulo)	0,000
	Tensão (fase)	0,007
	Potência activa	0,000
	Potência reactiva	0,021
57 Barramentos	Tensão (módulo)	0,005
	Tensão (fase)	-0,161
	Potência activa	-0,0021
	Potência reactiva	0,6933

Tabela B3 – Resultados da comparação entre as tensões obtidas nos FC realizados com o programa FCNR e o Power World para a rede 14 barramentos

Barramento		Módulo (pu)			Fase (graus)		
Número	Tipo	FCNR	Power World	Erro (%)	FCNR	Power World	Erro (%)
1	Ref.	1,060	1,060				
2	PV	1,045	1,045		-4,983	-4,983	0,000
3	PV	1,010	1,010		-12,725	-12,725	0,000
4	PQ	1,018	1,018	0,000	-10,313	-10,313	0,000
5	PQ	1,020	1,020	0,000	-8,774	-8,774	0,000
6	PV	1,070	1,070		-14,221	-14,221	0,000
7	PQ	1,062	1,062	0,000	-13,360	-13,360	0,000
8	PV	1,090	1,090		-13,360	-13,360	0,000
9	PQ	1,056	1,056	0,000	-14,938	-14,939	0,007
10	PQ	1,051	1,051	0,000	-15,097	-15,097	0,000
11	PQ	1,057	1,057	0,000	-14,791	-14,791	0,000
12	PQ	1,055	1,055	0,000	-15,076	-15,076	0,000
13	PQ	1,050	1,050	0,000	-15,156	-15,156	0,000
14	PQ	1,036	1,036	0,000	-16,034	-16,034	0,000
NOTA - Potência de base de 100 MVA							

Tabela B4 – Resultados da comparação entre as potências produzidas nos FC realizados com o FCNR e com o Power World para a rede 14 barramentos

Barramento		Potência activa (pu)			Potência reactiva (pu)		
Número	Tipo	FCNR	Power World	Erro (%)	FCNR	Power World	Erro (%)
1	Ref.	2,324	2,324	0,000			
2	PV	0,400	0,400	0,000	0,4356	0,4356	0,000
3	PV	0	0		0,2507	0,2508	0,021
6	PV	0	0		0,1273	0,1273	0,000
8	PV	0	0		0,1762	0,1762	0,000
NOTA - Potência de base de 100 MVA							

Tabela B5 – Resultados da comparação entre as tensões obtidas nos FC realizados com o FCNR e o Power World para a rede 57 barramentos

Barramento		Módulo (pu)			Fase (graus)		
Número	Tipo	Matlab	Power World	Erro (%)	Matlab	Power World	Erro (%)
1	Ref	1,040	1,040		0,000	0,000	
2	PV	1,010	1,010		-1,188	-1,190	-0,161
3	PV	0,985	0,985		-5,988	-5,990	-0,034
4	PQ	0,981	0,981	0,000	-7,337	-7,340	-0,045
5	PQ	0,977	0,977	0,000	-8,546	-8,550	-0,044
6	PV	0,980	0,980		-8,674	-8,670	0,046
7	PQ	0,984	0,984	0,000	-7,601	-7,600	0,011
8	PV	1,005	1,005		-4,478	-4,480	-0,054
9	PV	0,980	0,980		-9,584	-9,580	0,046
10	PQ	0,986	0,986	0,000	-11,449	-11,450	-0,005
11	PQ	0,974	0,974	0,000	-10,193	-10,190	0,028
12	PV	1,015	1,015		-10,471	-10,470	0,007
13	PQ	0,979	0,979	0,000	-9,803	-9,800	0,034
14	PQ	0,970	0,970	0,000	-9,350	-9,350	0,000
15	PQ	0,988	0,988	0,000	-7,190	-7,190	0,000
16	PQ	1,013	1,013	0,000	-8,859	-8,860	-0,011
17	PQ	1,018	1,017	0,005	-5,396	-5,400	-0,077
18	PQ	1,001	1,001	0,000	-11,729	-11,730	-0,009
19	PQ	0,970	0,970	0,000	-13,226	-13,230	-0,029
20	PQ	0,964	0,964	0,000	-13,444	-13,440	0,029
21	PQ	1,009	1,009	0,000	-12,929	-12,930	-0,010
22	PQ	1,010	1,010	0,000	-12,874	-12,870	0,034
23	PQ	1,008	1,008	0,000	-12,940	-12,940	0,000
24	PQ	0,999	0,999	0,000	-13,293	-13,290	0,019
25	PQ	0,983	0,983	0,000	-18,173	-18,170	0,017
26	PQ	0,959	0,959	0,000	-12,981	-12,980	0,011

Barramento		Módulo (pu)			Fase (graus)		
Número	Tipo	Matlab	Power World	Erro (%)	Matlab	Power World	Erro (%)
27	PQ	0,982	0,982	0,000	-11,514	-11,510	0,031
28	PQ	0,997	0,997	0,000	-10,482	-10,480	0,016
29	PQ	1,010	1,010	0,000	-9,771	-9,770	0,012
30	PQ	0,963	0,963	0,000	-18,720	-18,720	0,000
31	PQ	0,936	0,936	0,000	-19,383	-19,380	0,016
32	PQ	0,950	0,950	0,000	-18,512	-18,510	0,009
33	PQ	0,948	0,948	0,000	-18,551	-18,550	0,006
34	PQ	0,959	0,959	0,000	-14,149	-14,150	-0,010
35	PQ	0,966	0,966	0,000	-13,906	-13,910	-0,027
36	PQ	0,976	0,976	0,000	-13,635	-13,630	0,034
37	PQ	0,985	0,985	0,000	-13,446	-13,450	-0,033
38	PQ	1,013	1,013	0,000	-12,735	-12,730	0,036
39	PQ	0,983	0,983	0,000	-13,491	-13,490	0,006
40	PQ	0,973	0,973	0,000	-13,658	-13,660	-0,014
41	PQ	0,996	0,996	0,000	-14,076	-14,080	-0,026
42	PQ	0,967	0,967	0,000	-15,532	-15,530	0,015
43	PQ	1,010	1,010	0,000	-11,354	-11,350	0,038
44	PQ	1,017	1,017	0,000	-11,856	-11,860	-0,032
45	PQ	1,036	1,036	0,000	-9,270	-9,270	0,000
46	PQ	1,060	1,060	0,000	-11,116	-11,120	-0,037
47	PQ	1,033	1,033	0,000	-12,511	-12,510	0,009
48	PQ	1,027	1,027	0,000	-12,610	-12,610	0,000
49	PQ	1,036	1,036	0,000	-12,936	-12,940	-0,034
50	PQ	1,023	1,023	0,000	-13,412	-13,410	0,017
51	PQ	1,052	1,052	0,000	-12,533	-12,530	0,023
52	PQ	0,980	0,980	0,000	-11,498	-11,500	-0,022
53	PQ	0,971	0,971	0,000	-12,252	-12,250	0,017
54	PQ	0,996	0,996	0,000	-11,710	-11,710	0,000
55	PQ	1,031	1,031	0,000	-10,801	-10,800	0,007
56	PQ	0,968	0,968	0,000	-16,065	-16,070	-0,030
57	PQ	0,965	0,965	0,000	-16,584	-16,580	0,022
Erro máximo				0,005			0,046
Erro mínimo				0,000			-0,161
NOTA - Potência de base de 100 MVA							

Tabela B6 – Resultados da comparação entre as potências produzidas nos FC realizados com o FCNR e o Power World para a rede 57 barramentos

Barramento		Potência activa (pu)			Potência reactiva (pu)		
Número	Tipo	FCNR	Power World	Erro (%)	FCNR	Power World	Erro (%)
1	Ref.	4,7865	4,7866	-0,0021	0	0	
2	PV	0	0		-0,0076	-0,0075	0,6933
3	PV	0,4000	0,4	0,0000	-0,0090	-0,0090	0,0000
6	PV	0	0		0,0087	0,0087	0,0000
8	PV	4,5000	4,5	0,0000	0,6210	0,6210	0,0000
9	PV	0	0		0,0229	0,0229	0,0000
12	PV	3,1000	3,1	0,0000	1,2863	1,2863	0,0000
Erro máximo				-0,0021			0,6933
Erro mínimo				0			0
NOTA - Potência de base de 100 MVA							

Como se pode ver na tabela B6, o erro máximo de 0,69 % é desprezável face aos valores em comparação.

Anexo C

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM AS REDES DE TESTE

ANEXO C

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM AS REDES DE TESTE

Tabela C.1 – Tensões nos barramentos para vários pontos de carga para a rede de 57 barramentos (ordenada por número crescente de barramento)

Barramento		Tensão para os aumentos de carga em (pu) (1)					
Nº	Tipo	Base	10 %	20 %	30 %	40 %	40,7 %
1	Ref	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040
2	PV	1.010	1.010	1.010	1.008	0.987	0.983
3	PV	0.985	0.985	0.985	0.968	0.899	0.884
4	PQ	0.981	0.980	0.979	0.961	0.882	0.865
5	PQ	0.977	0.976	0.974	0.960	0.873	0.853
6	PV	0.980	0.980	0.980	0.968	0.880	0.860
7	PQ	0.984	0.982	0.979	0.970	0.881	0.858
8	PV	1.005	1.005	1.005	1.005	0.927	0.906
9	PV	0.980	0.976	0.965	0.948	0.856	0.834
10	PQ	0.986	0.980	0.961	0.934	0.838	0.817
11	PQ	0.974	0.968	0.952	0.928	0.832	0.810
12	PV	1.015	1.012	0.992	0.963	0.877	0.859
13	PQ	0.979	0.973	0.956	0.930	0.839	0.819
14	PQ	0.970	0.963	0.947	0.921	0.831	0.812
15	PQ	0.988	0.983	0.973	0.951	0.877	0.861
16	PQ	1.013	1.007	0.988	0.960	0.886	0.872
17	PQ	1.018	1.011	0.998	0.979	0.934	0.926
18	PQ	1.001	0.996	0.989	0.965	0.869	0.849
19	PQ	0.970	0.960	0.945	0.914	0.803	0.778
20	PQ	0.964	0.952	0.933	0.900	0.783	0.757
21	PQ	1.009	0.995	0.973	0.936	0.812	0.783
22	PQ	1.010	0.996	0.973	0.937	0.812	0.783

Barramento		Tensão para os aumentos de carga em (pu) (1)					
Nº	Tipo	Base	10 %	20 %	30 %	40 %	40,7 %
23	PQ	1.008	0.995	0.972	0.935	0.809	0.779
24	PQ	0.999	0.984	0.960	0.924	0.782	0.745
25	PQ	0.983	0.959	0.925	0.875	0.688	0.634
26	PQ	0.959	0.945	0.924	0.891	0.758	0.724
27	PQ	0.982	0.972	0.959	0.937	0.821	0.792
28	PQ	0.997	0.990	0.980	0.963	0.856	0.829
29	PQ	1.010	1.005	0.998	0.984	0.883	0.858
30	PQ	0.963	0.937	0.900	0.846	0.647	0.589
31	PQ	0.936	0.907	0.866	0.806	0.594	0.530
32	PQ	0.950	0.924	0.886	0.830	0.634	0.577
33	PQ	0.948	0.921	0.883	0.826	0.629	0.571
34	PQ	0.959	0.939	0.908	0.862	0.709	0.670
35	PQ	0.966	0.947	0.918	0.873	0.726	0.690
36	PQ	0.976	0.958	0.930	0.888	0.747	0.713
37	PQ	0.985	0.968	0.942	0.901	0.765	0.732
38	PQ	1.013	1.000	0.977	0.941	0.819	0.790
39	PQ	0.983	0.966	0.939	0.898	0.762	0.729
40	PQ	0.973	0.955	0.927	0.884	0.743	0.709
41	PQ	0.996	0.984	0.962	0.928	0.806	0.777
42	PQ	0.967	0.950	0.922	0.882	0.743	0.710
43	PQ	1.010	1.001	0.983	0.956	0.848	0.824
44	PQ	1.017	1.005	0.985	0.951	0.837	0.811
45	PQ	1.036	1.030	1.017	0.991	0.899	0.879
46	PQ	1.060	1.051	1.032	1.000	0.893	0.870
47	PQ	1.033	1.022	1.000	0.966	0.850	0.823
48	PQ	1.027	1.015	0.993	0.958	0.840	0.813
49	PQ	1.036	1.025	1.002	0.967	0.850	0.824
50	PQ	1.023	1.011	0.986	0.949	0.830	0.803
51	PQ	1.052	1.044	1.022	0.991	0.883	0.860
52	PQ	0.980	0.971	0.957	0.936	0.819	0.791
53	PQ	0.971	0.959	0.943	0.919	0.796	0.767
54	PQ	0.996	0.987	0.972	0.950	0.836	0.809
55	PQ	1.031	1.026	1.013	0.994	0.892	0.868
56	PQ	0.968	0.951	0.923	0.881	0.738	0.704
57	PQ	0.965	0.947	0.918	0.874	0.728	0.692
(1) - Potência de base de 100 MVA							

Tabela C.2 – Tensões nos barramentos para vários pontos de carga para a rede de 57 barramentos (ordenados em primeiro lugar por tipo de barramento e em segundo lugar por valor crescente da tensão do ultimo FC)

Barramento		Tensão para os aumentos de carga em (pu)					
Nº	Tipo	Base	10 %	20 %	30 %	40 %	40,7 %
1	Ref	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040
2	PV	1.010	1.010	1.010	1.008	0.987	0.983
3	PV	0.985	0.985	0.985	0.968	0.899	0.884
6	PV	0.980	0.980	0.980	0.968	0.880	0.860
8	PV	1.005	1.005	1.005	1.005	0.927	0.906
9	PV	0.980	0.976	0.965	0.948	0.856	0.834
12	PV	1.015	1.012	0.992	0.963	0.877	0.859
31	PQ	0.936	0.907	0.866	0.806	0.594	0.530
33	PQ	0.948	0.921	0.883	0.826	0.629	0.571
32	PQ	0.950	0.924	0.886	0.830	0.634	0.577
30	PQ	0.963	0.937	0.900	0.846	0.647	0.589
25	PQ	0.983	0.959	0.925	0.875	0.688	0.634
34	PQ	0.959	0.939	0.908	0.862	0.709	0.670
35	PQ	0.966	0.947	0.918	0.873	0.726	0.690
57	PQ	0.965	0.947	0.918	0.874	0.728	0.692
56	PQ	0.968	0.951	0.923	0.881	0.738	0.704
40	PQ	0.973	0.955	0.927	0.884	0.743	0.709
42	PQ	0.967	0.950	0.922	0.882	0.743	0.710
36	PQ	0.976	0.958	0.930	0.888	0.747	0.713
26	PQ	0.959	0.945	0.924	0.891	0.758	0.724
39	PQ	0.983	0.966	0.939	0.898	0.762	0.729
37	PQ	0.985	0.968	0.942	0.901	0.765	0.732
24	PQ	0.999	0.984	0.960	0.924	0.782	0.745
20	PQ	0.964	0.952	0.933	0.900	0.783	0.757
53	PQ	0.971	0.959	0.943	0.919	0.796	0.767
41	PQ	0.996	0.984	0.962	0.928	0.806	0.777
19	PQ	0.970	0.960	0.945	0.914	0.803	0.778
23	PQ	1.008	0.995	0.972	0.935	0.809	0.779
22	PQ	1.010	0.996	0.973	0.937	0.812	0.783
21	PQ	1.009	0.995	0.973	0.936	0.812	0.783
38	PQ	1.013	1.000	0.977	0.941	0.819	0.790
52	PQ	0.980	0.971	0.957	0.936	0.819	0.791
27	PQ	0.982	0.972	0.959	0.937	0.821	0.792
50	PQ	1.023	1.011	0.986	0.949	0.830	0.803
54	PQ	0.996	0.987	0.972	0.950	0.836	0.809
11	PQ	0.974	0.968	0.952	0.928	0.832	0.810
44	PQ	1.017	1.005	0.985	0.951	0.837	0.811
14	PQ	0.970	0.963	0.947	0.921	0.831	0.812
48	PQ	1.027	1.015	0.993	0.958	0.840	0.813
10	PQ	0.986	0.980	0.961	0.934	0.838	0.817
13	PQ	0.979	0.973	0.956	0.930	0.839	0.819
47	PQ	1.033	1.022	1.000	0.966	0.850	0.823
43	PQ	1.010	1.001	0.983	0.956	0.848	0.824

Barramento		Tensão para os aumentos de carga em (pu)					
Nº	Tipo	Base	10 %	20 %	30 %	40 %	40,7 %
49	PQ	1.036	1.025	1.002	0.967	0.850	0.824
28	PQ	0.997	0.990	0.980	0.963	0.856	0.829
18	PQ	1.001	0.996	0.989	0.965	0.869	0.849
5	PQ	0.977	0.976	0.974	0.960	0.873	0.853
29	PQ	1.010	1.005	0.998	0.984	0.883	0.858
7	PQ	0.984	0.982	0.979	0.970	0.881	0.858
51	PQ	1.052	1.044	1.022	0.991	0.883	0.860
15	PQ	0.988	0.983	0.973	0.951	0.877	0.861
4	PQ	0.981	0.980	0.979	0.961	0.882	0.865
55	PQ	1.031	1.026	1.013	0.994	0.892	0.868
46	PQ	1.060	1.051	1.032	1.000	0.893	0.870
16	PQ	1.013	1.007	0.988	0.960	0.886	0.872
45	PQ	1.036	1.030	1.017	0.991	0.899	0.879
17	PQ	1.018	1.011	0.998	0.979	0.934	0.926
(1) - Potência de base de 100 MVA							

Tabela C3 – Coeficientes de sensibilidade $\delta Q/\delta V$ dos barramentos e valores da grandeza FSQV para a rede de simulação de 57 barramentos

Barramento		FC (número de ordem)					
Número	Tipo	1	100	200	300	400	407
1	REF	60,0620	60,0510	60,2600	60,7870	63,0310	63,5470
2	PV	42,7540	42,7830	42,8310	42,9080	41,9060	41,7050
3	PV	51,6170	51,8060	52,1250	51,2990	47,7420	46,8950
4	PQ	40,8980	40,8580	40,8030	40,0910	36,8680	36,0670
5	PQ	18,4500	18,4290	18,4030	18,1250	16,5100	16,0870
6	PV	33,2540	33,3410	33,4490	33,1020	30,2240	29,4480
7	PQ	38,8270	38,7430	38,6240	38,2890	34,8520	33,8590
8	PV	38,6940	38,8100	39,0960	39,6310	37,2230	36,3830
9	PV	52,5240	52,3760	51,7270	50,7870	45,8980	44,5740
10	PQ	29,0160	28,8380	28,2840	27,4880	24,7240	24,0270
11	PQ	31,0300	30,8380	30,3460	29,5900	26,6020	25,8210
12	PV	45,1640	45,2590	44,3950	43,1660	39,5900	38,7470
13	PQ	70,5560	70,1060	68,9280	67,0330	60,6190	59,0100
14	PQ	52,8480	52,4540	51,6070	50,1540	45,3760	44,1820
15	PQ	64,5890	64,2650	63,5940	62,1690	57,4130	56,2500
16	PQ	16,5050	16,4010	16,0840	15,6360	14,4450	14,1740
17	PQ	14,2850	14,1930	13,9950	13,7240	13,0830	12,9470
18	PQ	4,9376	4,9020	4,8589	4,7269	4,2309	4,1085
19	PQ	2,5371	2,5097	2,4705	2,3885	2,1023	2,0290
20	PQ	2,7887	2,7528	2,6986	2,5996	2,2660	2,1792
21	PQ	7,3695	7,2733	7,1111	6,8465	5,9611	5,7233

Barramento		FC (número de ordem)					
Número	Tipo	1	100	200	300	400	407
22	PQ	76,8720	75,8600	74,1280	71,3550	62,1000	59,6030
23	PQ	49,3270	48,6630	47,5400	45,7460	39,7280	38,0950
24	PQ	23,8220	23,4580	22,9030	22,0330	18,7400	17,7680
25	PQ	4,9022	4,7813	4,6080	4,3490	3,4216	3,1160
26	PQ	22,9270	22,6040	22,1070	21,3200	18,2230	17,3090
27	PQ	9,9601	9,8680	9,7340	9,5105	8,3643	8,0318
28	PQ	18,6030	18,4750	18,2930	17,9720	16,0130	15,4480
29	PQ	30,3710	30,2200	30,0050	29,5940	26,6280	25,7750
30	PQ	4,6302	4,5042	4,3249	4,0589	3,1184	2,8031
31	PQ	2,1402	2,0699	1,9710	1,8260	1,3257	1,1526
32	PQ	13,9280	13,5510	12,9980	12,1730	9,3719	8,4471
33	PQ	12,0230	11,6920	11,2050	10,4820	8,0309	7,2195
34	PQ	9,5711	9,3738	9,0675	8,6065	7,1185	6,6878
35	PQ	19,5060	19,1250	18,5270	17,6220	14,7130	13,8880
36	PQ	42,2560	41,5080	40,3060	38,4690	32,5320	30,8760
37	PQ	42,0160	41,3260	40,1970	38,4550	32,8010	31,2400
38	PQ	63,8810	63,0580	61,6240	59,3290	51,7800	49,7630
39	PQ	19,3090	18,9880	18,4630	17,6560	15,0390	14,3170
40	PQ	15,6460	15,3660	14,9160	14,2310	12,0200	11,4040
41	PQ	6,7216	6,6378	6,4813	6,2495	5,4339	5,2150
42	PQ	4,0018	3,9285	3,8067	3,6305	3,0467	2,8882
43	PQ	9,0390	8,9660	8,8025	8,5547	7,6150	7,3669
44	PQ	20,4880	20,2580	19,8480	19,1660	16,9150	16,3200
45	PQ	16,6010	16,5020	16,2920	15,8790	14,4530	14,0850
46	PQ	28,4030	28,1580	27,6580	26,8170	24,0240	23,3060
47	PQ	41,0630	40,5960	39,7330	38,3410	33,8030	32,6190
48	PQ	48,0190	47,4620	46,4410	44,8000	39,4210	38,0090
49	PQ	20,9390	20,6960	20,2310	19,5090	17,1720	16,5680
50	PQ	8,9724	8,8505	8,6186	8,2784	7,2107	6,9395
51	PQ	18,1530	18,0040	17,6220	17,0750	15,2470	14,7880
52	PQ	9,4935	9,3965	9,2603	9,0551	7,9495	7,6401
53	PQ	8,5326	8,4181	8,2583	8,0322	6,9403	6,6386
54	PQ	5,3561	5,3075	5,2232	5,1027	4,5021	4,3373
55	PQ	11,3930	11,3350	11,1890	10,9760	9,8650	9,5623
56	PQ	6,2465	6,1345	5,9482	5,6742	4,7641	4,5146
57	PQ	3,2543	3,1916	3,0894	2,9391	2,4456	2,3095
FSQV		1467,0735	1455,3220	1433,1100	1395,4078	1252,5425	1213,8139

Tabela C4 – Cargas finais referentes aos cenários B1 a B11 para a rede de simulação de 57 barramentos (1ªabordagem)

Número Barram.	Cargas finais correspondentes aos cenários (pu) (1)										
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
1	0,239	0,239	0,216	0,205	0,198	0,193	0,239	0,216	0,205	0,198	0,193
2	1,237	0,880	1,238	1,237	1,236	1,236	1,237	1,118	1,059	1,023	0,999
3	0,295	0,210	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295	0,267	0,253	0,244	0,238
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,056	0,056	0,051	0,048	0,046	0,045	0,056	0,051	0,048	0,046	0,045
6	0,028	0,028	0,025	0,024	0,023	0,023	0,028	0,025	0,024	0,023	0,023
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0,309	0,309	0,280	0,265	0,256	0,250	0,309	0,280	0,265	0,256	0,250
9	0,366	0,366	0,330	0,313	0,302	0,295	0,366	0,330	0,313	0,302	0,295
10	0,028	0,028	0,025	0,024	0,023	0,023	0,028	0,025	0,024	0,023	0,023
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0,337	0,337	0,305	0,289	0,279	0,272	0,337	0,305	0,289	0,279	0,272
13	0,032	0,032	0,029	0,028	0,027	0,026	0,032	0,029	0,028	0,027	0,026
14	0,075	0,075	0,067	0,064	0,062	0,060	0,075	0,067	0,064	0,062	0,060
15	0,070	0,070	0,064	0,060	0,058	0,057	0,070	0,064	0,060	0,058	0,057
16	0,042	0,042	0,038	0,036	0,035	0,034	0,042	0,038	0,036	0,035	0,034
17	0,112	0,112	0,102	0,096	0,093	0,091	0,112	0,102	0,096	0,093	0,091
18	0,138	0,138	0,125	0,118	0,114	0,111	0,138	0,125	0,118	0,114	0,111
19	0,008	0,008	0,008	0,007	0,007	0,007	0,006	0,008	0,008	0,008	0,008
20	0,014	0,014	0,013	0,012	0,012	0,011	0,010	0,014	0,014	0,014	0,014
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0,030	0,030	0,027	0,025	0,024	0,024	0,030	0,027	0,025	0,024	0,024
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0,045	0,045	0,041	0,038	0,037	0,036	0,045	0,041	0,038	0,037	0,036
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0,007	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006
28	0,032	0,032	0,029	0,028	0,027	0,026	0,032	0,029	0,028	0,027	0,026
29	0,037	0,037	0,033	0,031	0,030	0,030	0,037	0,033	0,031	0,030	0,030
30	0,025	0,025	0,023	0,022	0,021	0,020	0,018	0,025	0,025	0,025	0,025
31	0,041	0,041	0,037	0,035	0,034	0,033	0,029	0,041	0,041	0,041	0,041
32	0,011	0,011	0,010	0,010	0,009	0,009	0,011	0,010	0,010	0,009	0,009
33	0,027	0,027	0,024	0,023	0,022	0,022	0,027	0,024	0,023	0,022	0,022
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0,042	0,042	0,038	0,036	0,035	0,034	0,042	0,038	0,036	0,035	0,034
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0,098	0,098	0,089	0,084	0,081	0,079	0,098	0,089	0,084	0,081	0,079
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0,042	0,042	0,038	0,036	0,035	0,034	0,042	0,038	0,036	0,035	0,034
42	0,062	0,062	0,056	0,053	0,051	0,050	0,044	0,062	0,062	0,062	0,062
43	0,014	0,014	0,013	0,012	0,012	0,011	0,014	0,013	0,012	0,012	0,011
44	0,025	0,025	0,023	0,022	0,021	0,020	0,025	0,023	0,022	0,021	0,020

Número Barram.	Cargas finais correspondentes aos cenários (pu) (1)										
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0,163	0,163	0,147	0,140	0,135	0,132	0,163	0,147	0,140	0,135	0,132
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0,120	0,120	0,108	0,102	0,099	0,096	0,120	0,108	0,102	0,099	0,096
50	0,148	0,148	0,133	0,126	0,122	0,119	0,148	0,133	0,126	0,122	0,119
51	0,075	0,075	0,067	0,064	0,062	0,060	0,075	0,067	0,064	0,062	0,060
52	0,031	0,031	0,028	0,026	0,026	0,025	0,031	0,028	0,026	0,026	0,025
53	0,141	0,141	0,127	0,120	0,116	0,114	0,141	0,127	0,120	0,116	0,114
54	0,020	0,020	0,018	0,017	0,016	0,016	0,020	0,018	0,017	0,016	0,016
55	0,048	0,048	0,043	0,041	0,040	0,039	0,048	0,043	0,041	0,040	0,039
56	0,031	0,031	0,028	0,026	0,026	0,025	0,031	0,028	0,026	0,026	0,025
57	0,028	0,028	0,025	0,024	0,023	0,023	0,020	0,028	0,028	0,028	0,028
Totais	4,730	4,287	4,423	4,268	4,174	4,112	4,678	4,293	4,073	3,940	3,852
(1) - Potência de base de 100 MVA											

Tabela C5 – Cargas finais referentes aos cenários B1 a B11 para a rede de simulação de 57 barramentos (2ªabordagem)

Número Barram.	Cenários de cargas (pu) (1)										
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
1	0,239	0,239	0,216	0,205	0,198	0,193	0,239	0,216	0,205	0,198	0,193
2	1,237	1,237	1,237	1,237	1,237	1,237	1,237	1,118	1,059	1,023	0,999
3	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295	0,267	0,253	0,244	0,238
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,056	0,056	0,051	0,048	0,046	0,045	0,056	0,051	0,048	0,046	0,045
6	0,028	0,028	0,025	0,024	0,023	0,023	0,028	0,025	0,024	0,023	0,023
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0,309	0,309	0,280	0,265	0,256	0,250	0,309	0,280	0,265	0,256	0,250
9	0,366	0,366	0,330	0,313	0,302	0,295	0,366	0,330	0,313	0,302	0,295
10	0,028	0,028	0,025	0,024	0,023	0,023	0,028	0,025	0,024	0,023	0,023
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0,337	0,337	0,305	0,289	0,279	0,272	0,337	0,305	0,289	0,279	0,272
13	0,032	0,032	0,029	0,028	0,027	0,026	0,032	0,029	0,028	0,027	0,026
14	0,075	0,075	0,067	0,064	0,062	0,060	0,075	0,067	0,064	0,062	0,060
15	0,070	0,070	0,064	0,060	0,058	0,057	0,070	0,064	0,060	0,058	0,057
16	0,042	0,042	0,038	0,036	0,035	0,034	0,042	0,038	0,036	0,035	0,034
17	0,112	0,112	0,102	0,096	0,093	0,091	0,112	0,102	0,096	0,093	0,091
18	0,138	0,138	0,125	0,118	0,114	0,111	0,138	0,125	0,118	0,114	0,111
19	0,008	0,008	0,008	0,007	0,007	0,007	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
20	0,014	0,014	0,013	0,012	0,012	0,011	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Número Barram.	Cenários de cargas (pu) (1)										
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
23	0,030	0,030	0,027	0,025	0,024	0,024	0,030	0,027	0,025	0,024	0,024
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0,045	0,045	0,041	0,038	0,037	0,036	0,045	0,041	0,038	0,037	0,036
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0,007	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006
28	0,032	0,032	0,029	0,028	0,027	0,026	0,032	0,029	0,028	0,027	0,026
29	0,037	0,037	0,033	0,031	0,030	0,030	0,037	0,033	0,031	0,030	0,030
30	0,025	0,025	0,023	0,022	0,021	0,020	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
31	0,041	0,041	0,037	0,035	0,034	0,033	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041
32	0,011	0,011	0,010	0,010	0,009	0,009	0,011	0,010	0,010	0,009	0,009
33	0,027	0,027	0,024	0,023	0,022	0,022	0,027	0,024	0,023	0,022	0,022
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0,042	0,042	0,038	0,036	0,035	0,034	0,042	0,038	0,036	0,035	0,034
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0,098	0,098	0,089	0,084	0,081	0,079	0,098	0,089	0,084	0,081	0,079
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0,042	0,042	0,038	0,036	0,035	0,034	0,042	0,038	0,036	0,035	0,034
42	0,062	0,062	0,056	0,053	0,051	0,050	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062
43	0,014	0,014	0,013	0,012	0,012	0,011	0,014	0,013	0,012	0,012	0,011
44	0,025	0,025	0,023	0,022	0,021	0,020	0,025	0,023	0,022	0,021	0,020
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0,163	0,163	0,147	0,140	0,135	0,132	0,163	0,147	0,140	0,135	0,132
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0,120	0,120	0,108	0,102	0,099	0,096	0,120	0,108	0,102	0,099	0,096
50	0,148	0,148	0,133	0,126	0,122	0,119	0,148	0,133	0,126	0,122	0,119
51	0,075	0,075	0,067	0,064	0,062	0,060	0,075	0,067	0,064	0,062	0,060
52	0,031	0,031	0,028	0,026	0,026	0,025	0,031	0,028	0,026	0,026	0,025
53	0,141	0,141	0,127	0,120	0,116	0,114	0,141	0,127	0,120	0,116	0,114
54	0,020	0,020	0,018	0,017	0,016	0,016	0,020	0,018	0,017	0,016	0,016
55	0,048	0,048	0,043	0,041	0,040	0,039	0,048	0,043	0,041	0,040	0,039
56	0,031	0,031	0,028	0,026	0,026	0,025	0,031	0,028	0,026	0,026	0,025
57	0,028	0,028	0,025	0,024	0,023	0,023	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
Totais	4,730	4,730	4,423	4,268	4,175	4,114	4,730	4,293	4,073	3,940	3,853
(1) - Potência de base de 100 MVA											

Tabela C6 – Erros dos valores FSQV finais para os aumentos de carga do barramento 2 da rede de simulação de 57 barramentos (incrementos de 5%)

Cresc. Carga (%)	Número de FC (1)	PMC (%) (2)	FSQV		Erro (%) (3)	Carga (pu)	
			Inicial	Final		Activa (4)	Reactiva (4)
0	407	40,6	1467,1	1213,8		0,030	0,880
5	407	40,6	1467,1	1203,8	-0,83	0,032	0,924
10	406	40,5	1467,1	1208,4	-0,45	0,033	0,968
15	405	40,4	1467,1	1211,6	-0,18	0,035	1,012
20	405	40,4	1467,1	1199,6	-1,18	0,036	1,056
25	404	40,3	1467,1	1205,7	-0,67	0,038	1,100
30	403	40,2	1467,1	1209,1	-0,39	0,039	1,144
35	402	40,1	1467,1	1211,8	-0,16	0,041	1,188
40	402	40,1	1467,1	1202,5	-0,94	0,042	1,232
45	401	40,0	1467,1	1206,4	-0,61	0,044	1,276
50	400	39,9	1467,1	1209,4	-0,37	0,045	1,320
55	400	39,9	1467,1	1198,2	-1,30	0,047	1,364
60	399	39,8	1467,1	1203,3	-0,87	0,048	1,408
65	398	39,7	1467,1	1206,6	-0,60	0,050	1,452
70	397	39,6	1467,1	1209,2	-0,39	0,051	1,496
75	397	39,6	1467,1	1199,6	-1,18	0,053	1,540
80	396	39,5	1467,1	1203,4	-0,86	0,054	1,584
85	395	39,4	1467,1	1206,3	-0,62	0,056	1,628
90	395	39,4	1467,1	1194,1	-1,65	0,057	1,672
95	394	39,3	1467,1	1199,7	-1,18	0,059	1,716
100	393	39,2	1467,1	1203,0	-0,90	0,060	1,760
105	392	39,1	1467,1	1205,5	-0,69	0,062	1,804
110	392	39,1	1467,1	1194,9	-1,58	0,063	1,848
115	391	39,0	1467,1	1199,3	-1,21	0,065	1,892
120	390	38,9	1467,1	1202,2	-0,97	0,066	1,936
125	389	38,8	1467,1	1204,5	-0,77	0,068	1,980
130	389	38,8	1467,1	1194,5	-1,62	0,069	2,024
135	388	38,7	1467,1	1198,2	-1,30	0,071	2,068
140	387	38,6	1467,1	1200,9	-1,07	0,072	2,112
145	386	38,5	1467,1	1203,2	-0,89	0,074	2,156
150	386	38,5	1467,1	1193,3	-1,72	0,075	2,200
155	385	38,4	1467,1	1196,8	-1,42	0,077	2,244
160	384	38,3	1467,1	1199,3	-1,21	0,078	2,288
165	383	38,2	1467,1	1201,5	-1,03	0,080	2,332
170	383	38,2	1467,1	1191,6	-1,87	0,081	2,376
175	382	38,1	1467,1	1195,0	-1,58	0,083	2,420
180	381	38,0	1467,1	1197,4	-1,37	0,084	2,464
185	380	37,9	1467,1	1199,5	-1,19	0,086	2,508
190	380	37,9	1467,1	1189,0	-2,08	0,087	2,552
195	379	37,8	1467,1	1192,6	-1,78	0,089	2,596
200	378	37,7	1467,1	1195,2	-1,56	0,090	2,640
205	377	37,6	1467,1	1197,1	-1,39	0,092	2,684

Cresc. Carga (%)	Número de FC (1)	PMC (%) (2)	FSQV		Erro (%) (3)	Carga (pu)	
			Inicial	Final		Activa (4)	Reactiva (4)
210	377	37,6	1467,1	1185,7	-2,37	0,093	2,728
215	376	37,5	1467,1	1189,8	-2,02	0,095	2,772
220	375	37,4	1467,1	1192,4	-1,80	0,096	2,816
225	374	37,3	1467,1	1194,5	-1,62	0,098	2,860
230	373	37,2	1467,1	1196,2	-1,47	0,099	2,904
235	373	37,2	1467,1	1186,0	-2,34	0,101	2,948
240	372	37,1	1467,1	1189,0	-2,09	0,102	2,992
245	371	37,0	1467,1	1191,3	-1,89	0,104	3,036
250	370	36,9	1467,1	1193,1	-1,74	0,105	3,080
(1) – Para atingir o colapso (2) – Em relação às cargas base da rede de simulação (3) – Em relação ao valor FSQV final com a carga base (1213,8) (4) – Pot. de base de 100 MVA							

Tabela C7 – Erros dos valores FSQV finais para os aumentos de carga do barramento 2 da rede de simulação de 57 barramentos (incrementos de 1%)

Cresc. Carga (%)	Número De FC (1)	PMC (%) (2)	FSQV		Erro (%) (3)	Carga (pu)	
			Inicial	Final		Activa (4)	Reactiva (4)
0	407	40,6	1467,1	1213,8	0,00	0,030	0,880
1	407	40,6	1467,1	1212,3	-0,13	0,030	0,889
2	407	40,6	1467,1	1210,6	-0,27	0,031	0,898
3	407	40,6	1467,1	1208,7	-0,42	0,031	0,906
4	407	40,6	1467,1	1206,5	-0,61	0,031	0,915
5	407	40,6	1467,1	1203,8	-0,83	0,032	0,924
6	407	40,6	1467,1	1198,8	-1,25	0,032	0,933
7	406	40,5	1467,1	1213,5	-0,03	0,032	0,942
8	406	40,5	1467,1	1211,9	-0,16	0,032	0,950
9	406	40,5	1467,1	1210,3	-0,29	0,033	0,959
10	406	40,5	1467,1	1208,4	-0,45	0,033	0,968
11	406	40,5	1467,1	1206,3	-0,62	0,033	0,977
12	406	40,5	1467,1	1203,7	-0,84	0,034	0,986
13	406	40,5	1467,1	1199,5	-1,19	0,034	0,994
14	405	40,4	1467,1	1213,1	-0,06	0,034	1,003
15	405	40,4	1467,1	1211,6	-0,18	0,035	1,012
16	405	40,4	1467,1	1209,9	-0,32	0,035	1,021
17	405	40,4	1467,1	1208,1	-0,48	0,035	1,030
18	405	40,4	1467,1	1206,0	-0,65	0,035	1,038
19	405	40,4	1467,1	1203,5	-0,86	0,036	1,047
20	405	40,4	1467,1	1199,6	-1,18	0,036	1,056
21	404	40,3	1467,1	1212,7	-0,09	0,036	1,065
22	404	40,3	1467,1	1211,2	-0,22	0,037	1,074

Cresc. Carga (%)	Número De FC (1)	PMC (%) (2)	FSQV		Erro (%) (3)	Carga (pu)	
			Inicial	Final		Activa (4)	Reactiva (4)
23	404	40,3	1467,1	1209,5	-0,35	0,037	1,082
24	404	40,3	1467,1	1207,8	-0,50	0,037	1,091
25	404	40,3	1467,1	1205,7	-0,67	0,038	1,100
26	404	40,3	1467,1	1203,2	-0,88	0,038	1,109
27	404	40,3	1467,1	1199,6	-1,18	0,038	1,118
28	403	40,2	1467,1	1212,3	-0,13	0,038	1,126
29	403	40,2	1467,1	1210,8	-0,25	0,039	1,135
30	403	40,2	1467,1	1209,1	-0,39	0,039	1,144
31	403	40,2	1467,1	1207,4	-0,53	0,039	1,153
32	403	40,2	1467,1	1205,3	-0,70	0,040	1,162
33	403	40,2	1467,1	1202,8	-0,91	0,040	1,170
34	403	40,2	1467,1	1199,4	-1,20	0,040	1,179
35	402	40,1	1467,1	1211,8	-0,16	0,041	1,188
36	402	40,1	1467,1	1210,4	-0,28	0,041	1,197
37	402	40,1	1467,1	1208,7	-0,43	0,041	1,206
38	402	40,1	1467,1	1206,9	-0,57	0,041	1,214
39	402	40,1	1467,1	1204,9	-0,74	0,042	1,223
40	402	40,1	1467,1	1202,5	-0,94	0,042	1,232
41	402	40,1	1467,1	1199,2	-1,22	0,042	1,241
42	401	40,0	1467,1	1211,4	-0,20	0,043	1,250
43	401	40,0	1467,1	1209,9	-0,32	0,043	1,258
44	401	40,0	1467,1	1208,3	-0,46	0,043	1,267
45	401	40,0	1467,1	1206,4	-0,61	0,044	1,276
46	401	40,0	1467,1	1204,4	-0,78	0,044	1,285
47	401	40,0	1467,1	1202,0	-0,98	0,044	1,294
48	401	40,0	1467,1	1198,7	-1,26	0,044	1,302
49	400	39,9	1467,1	1210,9	-0,24	0,045	1,311
50	400	39,9	1467,1	1209,4	-0,37	0,045	1,320
51	400	39,9	1467,1	1207,8	-0,50	0,045	1,329
52	400	39,9	1467,1	1205,9	-0,65	0,046	1,338
53	400	39,9	1467,1	1203,9	-0,82	0,046	1,346
54	400	39,9	1467,1	1201,5	-1,02	0,046	1,355
55	400	39,9	1467,1	1198,2	-1,30	0,047	1,364
56	399	39,8	1467,1	1210,3	-0,29	0,047	1,373
57	399	39,8	1467,1	1208,8	-0,41	0,047	1,382
58	399	39,8	1467,1	1207,2	-0,55	0,047	1,390
59	399	39,8	1467,1	1205,4	-0,70	0,048	1,399
60	399	39,8	1467,1	1203,3	-0,87	0,048	1,408
61	399	39,8	1467,1	1200,9	-1,07	0,048	1,417
62	399	39,8	1467,1	1197,6	-1,35	0,049	1,426
63	398	39,7	1467,1	1209,8	-0,33	0,049	1,434
64	398	39,7	1467,1	1208,2	-0,46	0,049	1,443
65	398	39,7	1467,1	1206,6	-0,60	0,050	1,452
66	398	39,7	1467,1	1204,8	-0,75	0,050	1,461
67	398	39,7	1467,1	1202,7	-0,92	0,050	1,470
68	398	39,7	1467,1	1200,3	-1,13	0,050	1,478

Cresc. Carga (%)	Número De FC (1)	PMC (%) (2)	FSQV		Erro (%) (3)	Carga (pu)	
			Inicial	Final		Activa (4)	Reactiva (4)
69	398	39,7	1467,1	1196,9	-1,41	0,051	1,487
70	397	39,6	1467,1	1209,2	-0,39	0,051	1,496
71	397	39,6	1467,1	1207,6	-0,51	0,051	1,505
72	397	39,6	1467,1	1206,0	-0,65	0,052	1,514
73	397	39,6	1467,1	1204,1	-0,81	0,052	1,522
74	397	39,6	1467,1	1202,1	-0,98	0,052	1,531
75	397	39,6	1467,1	1199,6	-1,18	0,053	1,540
76	397	39,6	1467,1	1196,1	-1,48	0,053	1,549
77	396	39,5	1467,1	1208,5	-0,44	0,053	1,558
78	396	39,5	1467,1	1207,0	-0,57	0,053	1,566
79	396	39,5	1467,1	1205,2	-0,71	0,054	1,575
80	396	39,5	1467,1	1203,4	-0,86	0,054	1,584
81	396	39,5	1467,1	1201,4	-1,04	0,054	1,593
82	396	39,5	1467,1	1198,8	-1,25	0,055	1,602
83	396	39,5	1467,1	1195,2	-1,56	0,055	1,610
84	395	39,4	1467,1	1207,8	-0,50	0,055	1,619
85	395	39,4	1467,1	1206,3	-0,62	0,056	1,628
86	395	39,4	1467,1	1204,5	-0,77	0,056	1,637
87	395	39,4	1467,1	1202,7	-0,92	0,056	1,646
88	395	39,4	1467,1	1200,6	-1,10	0,056	1,654
89	395	39,4	1467,1	1198,0	-1,32	0,057	1,663
90	395	39,4	1467,1	1194,1	-1,65	0,057	1,672
91	394	39,3	1467,1	1207,0	-0,56	0,057	1,681
92	394	39,3	1467,1	1205,5	-0,69	0,058	1,690
93	394	39,3	1467,1	1203,8	-0,83	0,058	1,698
94	394	39,3	1467,1	1201,9	-0,99	0,058	1,707
95	394	39,3	1467,1	1199,7	-1,18	0,059	1,716
96	394	39,3	1467,1	1197,0	-1,40	0,059	1,725
97	394	39,3	1467,1	1192,8	-1,76	0,059	1,734
98	393	39,2	1467,1	1206,3	-0,62	0,059	1,742
99	393	39,2	1467,1	1204,7	-0,76	0,060	1,751
100	393	39,2	1467,1	1203,0	-0,90	0,060	1,760
101	393	39,2	1467,1	1201,0	-1,06	0,060	1,769
102	393	39,2	1467,1	1198,9	-1,25	0,061	1,778
103	393	39,2	1467,1	1196,0	-1,49	0,061	1,786
104	393	39,2	1467,1	1190,8	-1,93	0,061	1,795
105	392	39,1	1467,1	1205,5	-0,69	0,062	1,804
106	392	39,1	1467,1	1203,9	-0,82	0,062	1,813
107	392	39,1	1467,1	1202,2	-0,97	0,062	1,822
108	392	39,1	1467,1	1200,2	-1,14	0,062	1,830
109	392	39,1	1467,1	1197,8	-1,33	0,063	1,839
110	392	39,1	1467,1	1194,9	-1,58	0,063	1,848
111	391	39,0	1467,1	1206,2	-0,63	0,063	1,857
112	391	39,0	1467,1	1204,7	-0,76	0,064	1,866
113	391	39,0	1467,1	1203,1	-0,89	0,064	1,874
114	391	39,0	1467,1	1201,3	-1,04	0,064	1,883

Cresc. Carga (%)	Número De FC (1)	PMC (%) (2)	FSQV		Erro (%) (3)	Carga (pu)	
			Inicial	Final		Activa (4)	Reactiva (4)
115	391	39,0	1467,1	1199,3	-1,21	0,065	1,892
116	391	39,0	1467,1	1196,9	-1,42	0,065	1,901
117	391	39,0	1467,1	1193,7	-1,69	0,065	1,910
118	390	38,9	1467,1	1205,4	-0,70	0,065	1,918
119	390	38,9	1467,1	1203,8	-0,83	0,066	1,927
120	390	38,9	1467,1	1202,2	-0,97	0,066	1,936
121	390	38,9	1467,1	1200,3	-1,13	0,066	1,945
122	390	38,9	1467,1	1198,2	-1,30	0,067	1,954
123	390	38,9	1467,1	1195,7	-1,51	0,067	1,962
124	390	38,9	1467,1	1192,1	-1,82	0,067	1,971
125	389	38,8	1467,1	1204,5	-0,77	0,068	1,980
126	389	38,8	1467,1	1202,9	-0,90	0,068	1,989
127	389	38,8	1467,1	1201,2	-1,05	0,068	1,998
128	389	38,8	1467,1	1199,3	-1,21	0,068	2,006
129	389	38,8	1467,1	1197,2	-1,39	0,069	2,015
130	389	38,8	1467,1	1194,5	-1,62	0,069	2,024
131	389	38,8	1467,1	1190,3	-1,98	0,069	2,033
132	388	38,7	1467,1	1203,5	-0,86	0,070	2,042
133	388	38,7	1467,1	1201,9	-0,99	0,070	2,050
134	388	38,7	1467,1	1200,2	-1,14	0,070	2,059
135	388	38,7	1467,1	1198,2	-1,30	0,071	2,068
136	388	38,7	1467,1	1196,0	-1,49	0,071	2,077
137	388	38,7	1467,1	1193,1	-1,74	0,071	2,086
138	387	38,6	1467,1	1204,1	-0,81	0,071	2,094
139	387	38,6	1467,1	1202,6	-0,93	0,072	2,103
140	387	38,6	1467,1	1200,9	-1,07	0,072	2,112
141	387	38,6	1467,1	1199,2	-1,22	0,072	2,121
142	387	38,6	1467,1	1197,1	-1,40	0,073	2,130
143	387	38,6	1467,1	1194,7	-1,60	0,073	2,138
144	387	38,6	1467,1	1191,5	-1,87	0,073	2,147
145	386	38,5	1467,1	1203,2	-0,89	0,074	2,156
146	386	38,5	1467,1	1201,6	-1,02	0,074	2,165
147	386	38,5	1467,1	1199,9	-1,16	0,074	2,174
148	386	38,5	1467,1	1198,0	-1,32	0,074	2,182
149	386	38,5	1467,1	1195,9	-1,50	0,075	2,191
150	386	38,5	1467,1	1193,3	-1,72	0,075	2,200
151	386	38,5	1467,1	1189,5	-2,04	0,075	2,209
(1) – Para atingir o colapso (2) – Em relação às cargas base da rede de simulação (3) – Em relação ao valor FSQV final com a carga base (1213,8) (4) – Pot. de base de 100 MVA							

Tabela C8 – Erros dos valores FSQV finais para os aumentos de carga do barramento 3 da rede de simulação de 57 barramentos (incrementos de 1%)

Cresc. Carga (%)	Número De FC (1)	PMC (%) (2)	FSQV		Erro (%) (3)	Carga (pu)	
			Inicial	Final		Activa (4)	Reactiva (4)
0	407	40,6	1467,1	1213,8	0,00	0,410	0,210
1	407	40,6	1467,1	1210,6	-0,27	0,414	0,212
2	407	40,6	1467,1	1206,4	-0,61	0,418	0,214
3	406	40,5	1467,1	1214,9	0,09	0,422	0,216
4	406	40,5	1467,1	1211,9	-0,16	0,426	0,218
5	406	40,5	1467,1	1208,3	-0,46	0,431	0,221
6	406	40,5	1467,1	1203,2	-0,88	0,435	0,223
7	405	40,4	1467,1	1213,1	-0,06	0,439	0,225
8	405	40,4	1467,1	1209,9	-0,33	0,443	0,227
9	405	40,4	1467,1	1205,7	-0,67	0,447	0,229
10	404	40,3	1467,1	1214,2	0,03	0,451	0,231
11	404	40,3	1467,1	1211,2	-0,22	0,455	0,233
12	404	40,3	1467,1	1207,6	-0,52	0,459	0,235
13	404	40,3	1467,1	1202,6	-0,93	0,463	0,237
14	403	40,2	1467,1	1212,4	-0,12	0,467	0,239
15	403	40,2	1467,1	1209,1	-0,39	0,472	0,242
16	403	40,2	1467,1	1204,9	-0,74	0,476	0,244
17	403	40,2	1467,1	1196,3	-1,46	0,480	0,246
18	402	40,1	1467,1	1210,4	-0,28	0,484	0,248
19	402	40,1	1467,1	1206,8	-0,58	0,488	0,250
20	402	40,1	1467,1	1201,8	-1,00	0,492	0,252
21	401	40,0	1467,1	1211,6	-0,19	0,496	0,254
22	401	40,0	1467,1	1208,3	-0,46	0,500	0,256
23	401	40,0	1467,1	1204,1	-0,81	0,504	0,258
24	400	39,9	1467,1	1212,6	-0,10	0,508	0,260
25	400	39,9	1467,1	1209,6	-0,35	0,513	0,263
26	400	39,9	1467,1	1205,9	-0,65	0,517	0,265
27	400	39,9	1467,1	1200,8	-1,09	0,521	0,267
28	399	39,8	1467,1	1210,7	-0,26	0,525	0,269
29	399	39,8	1467,1	1207,4	-0,53	0,529	0,271
30	399	39,8	1467,1	1203,2	-0,88	0,533	0,273
31	398	39,7	1467,1	1211,8	-0,17	0,537	0,275
32	398	39,7	1467,1	1208,7	-0,42	0,541	0,277
33	398	39,7	1467,1	1205,0	-0,73	0,545	0,279
34	398	39,7	1467,1	1199,8	-1,17	0,549	0,281
35	397	39,6	1467,1	1209,8	-0,33	0,554	0,284
36	397	39,6	1467,1	1206,4	-0,61	0,558	0,286
37	397	39,6	1467,1	1202,2	-0,96	0,562	0,288
38	396	39,5	1467,1	1210,9	-0,24	0,566	0,290
39	396	39,5	1467,1	1207,8	-0,50	0,570	0,292
40	396	39,5	1467,1	1204,0	-0,82	0,574	0,294
41	396	39,5	1467,1	1198,6	-1,27	0,578	0,296

Cresc. Carga (%)	Número De FC (1)	PMC (%) (2)	FSQV		Erro (%) (3)	Carga (pu)	
			Inicial	Final		Activa (4)	Reactiva (4)
42	395	39,4	1467,1	1208,9	-0,41	0,582	0,298
43	395	39,4	1467,1	1205,5	-0,69	0,586	0,300
44	395	39,4	1467,1	1201,1	-1,06	0,590	0,302
45	394	39,3	1467,1	1209,9	-0,32	0,595	0,305
46	394	39,3	1467,1	1206,8	-0,58	0,599	0,307
47	394	39,3	1467,1	1202,9	-0,90	0,603	0,309
48	394	39,3	1467,1	1197,3	-1,38	0,607	0,311
49	393	39,2	1467,1	1207,9	-0,49	0,611	0,313
50	393	39,2	1467,1	1204,4	-0,78	0,615	0,315
51	393	39,2	1467,1	1200,0	-1,15	0,619	0,317
52	392	39,1	1467,1	1208,9	-0,41	0,623	0,319
53	392	39,1	1467,1	1205,7	-0,67	0,627	0,321
54	392	39,1	1467,1	1201,8	-1,00	0,631	0,323
55	392	39,1	1467,1	1195,8	-1,51	0,636	0,326
56	391	39,0	1467,1	1206,8	-0,58	0,640	0,328
57	391	39,0	1467,1	1203,4	-0,87	0,644	0,330
58	391	39,0	1467,1	1198,7	-1,26	0,648	0,332
59	390	38,9	1467,1	1207,8	-0,49	0,652	0,334
60	390	38,9	1467,1	1204,6	-0,76	0,656	0,336
61	390	38,9	1467,1	1200,6	-1,10	0,660	0,338
62	390	38,9	1467,1	1193,9	-1,67	0,664	0,340
63	389	38,8	1467,1	1205,7	-0,67	0,668	0,342
64	389	38,8	1467,1	1202,1	-0,97	0,672	0,344
65	389	38,8	1467,1	1197,2	-1,38	0,677	0,347
66	388	38,7	1467,1	1206,8	-0,58	0,681	0,349
67	388	38,7	1467,1	1203,5	-0,86	0,685	0,351
68	388	38,7	1467,2	1199,2	-1,22	0,689	0,353
69	388	38,7	1467,2	1191,2	-1,89	0,693	0,355
70	387	38,6	1467,2	1204,6	-0,77	0,697	0,357
71	387	38,6	1467,2	1200,9	-1,08	0,701	0,359
72	387	38,6	1467,2	1195,6	-1,52	0,705	0,361
73	386	38,5	1467,2	1205,6	-0,68	0,709	0,363
74	386	38,5	1467,2	1202,2	-0,97	0,713	0,365
75	386	38,5	1467,2	1197,9	-1,33	0,718	0,368
76	385	38,4	1467,2	1206,6	-0,60	0,722	0,370
77	385	38,4	1467,2	1203,4	-0,87	0,726	0,372
78	385	38,4	1467,2	1199,5	-1,19	0,730	0,374
79	385	38,4	1467,2	1193,8	-1,68	0,734	0,376
80	384	38,3	1467,2	1204,3	-0,79	0,738	0,378
81	384	38,3	1467,2	1200,9	-1,08	0,742	0,380
82	384	38,3	1467,2	1196,2	-1,47	0,746	0,382

Cresc. Carga (%)	Número De FC (1)	PMC (%) (2)	FSQV		Erro (%) (3)	Carga (pu)	
			Inicial	Final		Activa (4)	Reactiva (4)
83	383	38,2	1467,2	1205,3	-0,71	0,750	0,384
84	383	38,2	1467,2	1202,0	-0,98	0,754	0,386
85	383	38,2	1467,2	1198,0	-1,32	0,759	0,389
86	383	38,2	1467,2	1191,6	-1,87	0,763	0,391
87	382	38,1	1467,2	1203,1	-0,89	0,767	0,393
88	382	38,1	1467,2	1199,4	-1,20	0,771	0,395
89	382	38,1	1467,2	1194,5	-1,61	0,775	0,397
90	381	38,0	1467,2	1204,1	-0,81	0,779	0,399
91	381	38,0	1467,2	1200,7	-1,09	0,783	0,401
92	381	38,0	1467,2	1196,4	-1,45	0,787	0,403
93	381	38,0	1467,2	1187,7	-2,20	0,791	0,405
(1) – Para atingir o colapso (2) – Em relação às cargas base da rede de simulação; (3) – Em relação ao valor FSQV final com a carga base (1213,8) (4) – Potência de base de 100 MVA							

Tabela C9 – Aumento das cargas base para um erro máximo de 1% no valor final do FSQV para a rede de simulação de 57 barramentos (incrementos de 1%)

Numero Barram.	PMC (%) (1)	Tempo (min) (2)	FSQV			Cargas				
			Inicial Valor	Final		Inicial (base)		Final		Aum_ento (%)
				Valor	Erro (3)	Pot. Act. (pu) (4)	Pot. React. (pu) (4)	Pot. Act. (pu) (4)	Pot. React. (pu) (4)	
2	40,6	6,01	1467,1	1203,8	-0,83	0,030	0,880	0,032	0,924	5
3	40,2	15,39	1467,1	1204,9	-0,74	0,410	0,210	0,476	0,244	16
4						0	0			
5	40,6	6,91	1467,1	1204,4	-0,78	0,130	0,040	0,137	0,042	5
6	40,2	6,81	1467,1	1212,1	-0,14	0,750	0,020	0,795	0,021	6
7						0	0			
8	40,1	6,00	1467,1	1206,9	-0,57	1,500	0,220	1,560	0,229	4
9	39,5	8,49	1467,0	1206,4	-0,61	1,210	0,260	1,307	0,281	8
10	40,6	11,11	1467,0	1203,1	-0,89	0,050	0,020	0,056	0,022	11
11						0	0			
12	39,1	6,70	1467,0	1202,2	-0,97	3,770	0,240	3,959	0,252	5
13	40,6	5,12	1467,0	1205,1	-0,72	0,180	0,023	0,187	0,024	4
14	40,5	13,66	1466,8	1203,3	-0,87	0,105	0,053	0,120	0,060	14
15	40,5	12,82	1466,9	1204,0	-0,82	0,220	0,050	0,249	0,057	13
16	40,2	17,90	1467,0	1205,0	-0,73	0,430	0,030	0,512	0,036	19
17	40,4	22,20	1467,0	1204,2	-0,80	0,420	0,080	0,521	0,099	24
18	40,4	8,55	1467,0	1206,8	-0,58	0,272	0,098	0,294	0,106	8

Numero Barram.	PMC (%) (1)	Tempo (min) (2)	FSQV			Cargas				
			Inicial Valor	Final		Inicial (base)		Final		Aum_ento (%)
				Valor	Erro (3)	Pot. Act. (pu) (4)	Pot. React. (pu) (4)	Pot. Act. (pu) (4)	Pot. React. (pu) (4)	
19	40,6	15,44	1467,0	1202,8	-0,92	0,033	0,006	0,038	0,007	16
20	40,6	16,22	1466,9	1202,6	-0,93	0,023	0,010	0,027	0,012	17
21						0	0			
22						0	0			
23	40,6	8,54	1466,9	1203,7	-0,84	0,063	0,021	0,067	0,022	6
24						0	0			
25	39,7	21,94	1465,9	1221,9	0,66	0,063	0,032	0,077	0,039	23
26						0	0			
27	40,3	23,83	1466,7	1205,4	-0,70	0,093	0,005	0,116	0,006	25
28	40,5	18,73	1466,9	1203,3	-0,87	0,046	0,023	0,055	0,028	20
29	40,4	11,93	1467,0	1205,9	-0,65	0,170	0,026	0,190	0,029	12
30	40,6	3,42	1467,0	1207,9	-0,49	0,036	0,018	0,037	0,018	2
31	39,9	11,83	1466,3	1224,5	0,88	0,058	0,029	0,065	0,032	12
32	40,6	6,89	1467,0	1204,9	-0,74	0,016	0,008	0,017	0,008	6
33	39,9	22,81	1466,0	1218,1	0,35	0,038	0,019	0,048	0,024	25
34						0	0			
35	37,8	116,47	1460,3	1217,1	0,27	0,060	0,030	0,143	0,071	138
36						0	0			
37						0	0			
38	40,6	5,13	1466,9	1206,8	-0,58	0,140	0,070	0,143	0,071	2
39						0	0			
40						0	0			
41	40,6	7,72	1467,0	1204,8	-0,75	0,063	0,030	0,066	0,032	5
42	40,3	15,34	1466,5	1206,9	-0,57	0,071	0,044	0,082	0,051	16
43	40,6	22,24	1467,0	1201,9	-0,99	0,020	0,010	0,025	0,012	24
44	40,4	17,04	1466,6	1204,6	-0,77	0,120	0,018	0,142	0,021	18
45						0	0			
46						0	0			
47	40,4	6,81	1466,6	1209,7	-0,34	0,297	0,116	0,312	0,122	5
48						0	0			
49	40,5	6,83	1466,8	1207,0	-0,57	0,180	0,085	0,189	0,089	5
50	39,9	17,81	1466,1	1207,1	-0,56	0,210	0,105	0,250	0,125	19
51	40,3	14,47	1466,9	1205,2	-0,72	0,180	0,053	0,207	0,061	15
52	40,6	7,72	1467,0	1204,3	-0,79	0,049	0,022	0,052	0,024	7
53	40,5	4,27	1467,0	1209,7	-0,34	0,200	0,100	0,206	0,103	3
54	40,6	10,27	1467,0	1203,6	-0,84	0,041	0,014	0,045	0,015	10
55	40,5	15,39	1467,1	1203,6	-0,85	0,068	0,034	0,079	0,039	16
56	40,6	4,27	1467,0	1206,0	-0,65	0,076	0,022	0,078	0,023	3
57	40,2	21,30	1466,3	1206,8	-0,58	0,067	0,020	0,082	0,025	23
(1) – Em relação às cargas base da rede de simulação (2) – Tempo gasto nas simulações do referido barramento (3) – Erro de comparação com o valor FSQV final, 1213,8, calculado com as cargas base (4) – Potência de base de 100 MVA										

Tabela C10 – Aumento das cargas base para um erro máximo de 2% no valor final do FSQV para a rede de simulação de 57 barramentos (incrementos de 1%)

Numero Barram.	PMC (%) (1)	Tempo (min) (2)	FSQV			Cargas				
			Inicial Valor	Final		Inicial (base)		Final		
				Valor	Erro (3)	Pot. Act. (pu) (4)	Pot. React. (pu) (4)	Pot. Act. (pu) (4)	Pot. React. (pu) (4)	Aum_ento (%)
2	38,5	2,10	1467,1	1193,3	-1,72	0,030	0,880	0,075	2,200	150
3	38,0	1,29	1467,2	1196,4	-1,45	0,410	0,210	0,787	0,403	92
4						0	0			
5	37,4	3,16	1466,7	1194,6	-1,61	0,130	0,040	0,429	0,132	230
6	34,7	1,11	1466,9	1201,8	-1,00	0,750	0,020	1,365	0,036	82
7						0	0			
8	35,5	0,53	1466,8	1197,0	-1,40	1,500	0,220	2,055	0,301	37
9	35,1	0,54	1466,9	1196,6	-1,44	1,210	0,260	1,682	0,361	39
10	37,7	5,98	1465,9	1193,5	-1,70	0,050	0,020	0,270	0,108	439
11						0	0			
12	35,0	0,28	1466,6	1191,2	-1,90	3,770	0,240	4,449	0,283	18
13	37,6	2,59	1464,6	1196,2	-1,47	0,180	0,023	0,522	0,067	190
14	37,5	3,54	1462,4	1194,0	-1,66	0,105	0,053	0,377	0,190	259
15	38,2	2,79	1464,3	1195,3	-1,55	0,220	0,050	0,636	0,145	189
16	36,4	2,20	1466,6	1196,4	-1,46	0,430	0,030	1,122	0,078	161
17	37,8	3,13	1466,5	1194,0	-1,66	0,420	0,080	1,369	0,261	226
18	31,8	2,40	1463,8	1237,4	1,91	0,272	0,098	0,748	0,270	175
19	35,8	8,05	1462,0	1228,4	1,19	0,033	0,006	0,226	0,041	586
20	35,3	10,08	1458,8	1226,7	1,05	0,023	0,010	0,194	0,084	744
21						0	0			
22						0	0			
23	21,4	15,80	1420,2	1226,3	1,01	0,063	0,021	0,939	0,313	1390
24						0	0			
25	38,8	0,64	1464,8	1234,3	1,66	0,063	0,032	0,090	0,046	43
26						0	0			
27	31,5	6,48	1457,9	1229,0	1,23	0,093	0,005	0,558	0,030	500
28	25,7	16,85	1451,7	1224,9	0,91	0,046	0,023	0,692	0,346	1404
29	20,5	8,79	1456,4	1228,2	1,17	0,170	0,026	1,479	0,226	770
30	39,0	0,79	1465,2	1229,2	1,25	0,036	0,018	0,056	0,028	56
31	39,2	0,35	1465,6	1234,5	1,68	0,058	0,029	0,071	0,036	23
32	39,0	1,76	1464,8	1228,9	1,23	0,016	0,008	0,036	0,018	127
33	38,9	0,76	1464,7	1234,4	1,67	0,038	0,019	0,059	0,029	54
34						0	0			
35	34,9	3,46	1453,9	1227,9	1,15	0,060	0,030	0,217	0,108	261
36						0	0			
37						0	0			
38	9,0	9,83	1375,2	1227,3	1,10	0,140	0,070	1,628	0,814	1063
39						0	0			
40						0	0			
41	32,1	6,27	1457,3	1225,2	0,93	0,063	0,030	0,370	0,176	487
42	35,8	2,19	1460,7	1231,2	1,41	0,071	0,044	0,187	0,116	163

Numero Barram.	PMC (%) (1)	Tempo (min) (2)	FSQV			Cargas				
			Inicial Valor	Final		Inicial (base)		Final		
				Valor	Erro (3)	Pot. Act. (pu) (4)	Pot. React. (pu) (4)	Pot. Act. (pu) (4)	Pot. React. (pu) (4)	Aum_ento (%)
43	35,8	18,14	1462,5	1208,2	-0,47	0,020	0,010	0,292	0,146	1362
44	19,2	12,43	1424,7	1226,6	1,04	0,120	0,018	1,472	0,221	1127
45						0	0			
46						0	0			
47	34,0	1,82	1453,7	1200,5	-1,11	0,297	0,116	0,701	0,274	136
48						0	0			
49	34,5	2,56	1456,6	1198,3	-1,29	0,180	0,085	0,529	0,250	194
50	25,9	3,49	1449,5	1234,7	1,69	0,210	0,105	0,821	0,411	291
51	36,9	2,05	1465,4	1197,5	-1,37	0,180	0,053	0,450	0,133	150
52	32,3	8,05	1462,4	1226,5	1,04	0,049	0,022	0,354	0,159	623
53	33,9	1,44	1463,6	1237,5	1,91	0,200	0,100	0,416	0,208	108
54	32,0	11,01	1464,2	1226,5	1,03	0,041	0,014	0,392	0,134	855
55	36,8	4,75	1466,6	1194,1	-1,65	0,068	0,034	0,306	0,153	350
56	35,3	2,68	1459,3	1228,7	1,21	0,076	0,022	0,230	0,067	203
57	36,3	2,25	1460,6	1230,9	1,39	0,067	0,020	0,179	0,053	167
(1) – Em relação às cargas base da rede de simulação (2) – Tempo gasto nas simulações do referido barramento (3) – Erro de comparação com o valor FSQV final, 1213,8, calculado com as cargas base (4) – Potência de base de 100 MVA										

Tabela C11 – Aumento das cargas base em dois barramentos para um erro máximo de 1% no valor final do FSQV para a rede de simulação de 57 barramentos (incrementos de 1%)

Bar.	Barramentos																			
	2	3	5	6	8	9	10	12	13	14	15	16	17	18	19	20	23	25	27	28
3	8																			
5	2	1																		
6	0	3	0																	
8	12	8	12	10																
9	4	3	4	6	1															
10	3	7	3	12	10	13														
12	2	1	2	0	3	4	3													
13	5	3	5	0	6	2	7	2												
14	2	1	6	0	20	4	14	2	9											
15	2	1	2	0	16	4	3	2	12	10										
16	9	10	9	1	2	12	5	4	1	4	4									
17	14	1	46	0	5	6	15	6	2	11	15	7								
18	3	2	3	28	6	11	9	1	5	10	12	13	1							
19	14	28	9	7	1	5	6	4	3	4	15	19	17	4						
20	9	43	9	3	1	5	15	4	3	4	15	9	17	4	8					
23	6	1	6	0	11	6	14	6	2	19	70	4	7	10	4	4				
25	26	29	28	33	58	0	3	9	27	27	23	30	22	25	23	21	27			
27	33	17	2	0	10	4	3	2	5	2	2	9	10	3	24	19	2	24		
28	7	12	7	4	3	12	11	3	51	3	12	29	3	1	5	5	3	21	24	
29	4	40	7	1	7	5	2	4	4	19	10	3	20	8	2	6	43	23	4	5
30	1	39	1	2	5	6	30	9	28	31	30	35	29	35	29	26	26	12	1	31
31	11	15	11	14	17	25	11	42	12	13	14	0	13	11	13	13	10	7	11	12
32	6	1	18	0	9	6	72	6	2	84	81	106	7	28	4	4	64	16	6	3
33	30	31	1	49	8	3	31	1	29	1	1	30	30	34	27	30	1	15	28	27
35	37	5	234	8	4	10	6	5	7	8	17	17	5	20	19	15	8	22	22	2
38	1	4	1	3	5	3	10	1	10	1	1	14	14	17	20	17	1	25	1	4
41	2	1	2	0	16	4	3	2	12	6	2	12	23	3	9	15	14	21	2	21
42	4	24	7	1	9	5	19	4	9	13	7	3	31	8	2	2	16	2	4	5
43	15	11	4	3	1	3	7	4	24	17	4	2	12	7	9	10	11	1	26	6
44	16	10	9	0	10	9	12	2	8	2	2	14	6	3	39	24	2	24	12	11
47	2	8	2	5	0	1	8	2	13	14	2	3	9	9	16	20	14	30	2	15
49	3	2	19	8	6	7	20	1	5	24	10	6	1	10	7	7	8	27	3	1
50	8	9	10	10	4	0	3	6	6	18	12	5	32	3	10	10	20	24	8	5
51	9	10	17	1	2	12	5	4	1	4	4	7	7	13	26	9	4	27	9	20
52	15	9	11	9	3	8	4	3	6	21	7	16	3	1	25	40	12	27	82	9
53	12	20	17	5	0	8	12	4	2	9	9	6	4	4	20	22	4	0	7	15
54	3	4	3	8	3	21	5	3	11	24	3	8	9	14	6	6	19	24	12	4
55	38	1	19	14	5	6	15	6	2	7	11	7	12	1	11	11	7	24	18	24
56	10	17	13	9	4	5	2	7	4	52	25	12	8	12	14	22	144	22	7	12
57	19	7	31	17	4	10	6	5	4	11	49	10	5	16	38	126	8	22	16	2

Bar.	Barramentos																			
	29	30	31	32	33	35	38	41	42	43	44	47	49	50	51	52	53	54	55	56
30	29																			
31	14	8																		
32	84	21	10																	
33	30	16	8	20																
35	1	24	13	45	25															
38	21	29	14	73	4	5														
41	7	1	14	68	1	143	1													
42	10	34	11	60	29	1	38	7												
43	46	5	10	62	31	7	8	4	10											
44	4	1	11	68	30	16	8	2	4	9										
47	9	35	12	9	30	54	24	2	6	42	2									
49	12	31	0	8	30	58	14	10	10	16	3	13								
50	2	30	12	106	32	9	21	12	2	1	8	7	3							
51	3	37	0	92	32	17	14	12	3	2	14	3	6	5						
52	8	30	12	66	29	163	17	7	11	5	43	4	1	11	19					
53	12	31	15	4	29	8	7	22	12	30	2	1	4	0	6	18				
54	26	27	14	70	28	2	7	3	12	7	12	8	9	3	8	4	10			
55	14	27	13	77	28	5	9	15	40	5	6	16	1	42	7	3	4	9		
56	1	32	13	55	28	1	9	16	42	15	7	15	20	22	12	5	24	2	8	
57	1	26	13	8	27	79	5	28	1	7	10	30	30	14	10	12	8	2	5	1

Tabela C12 – Aumento das cargas base em dois barramentos simultâneos para um erro máximo de 2% no valor final do FSQV para a rede de simulação de 57 barramentos (incrementos de 1%)

Bar.	Barramentos																			
	2	3	5	6	8	9	10	12	13	14	15	16	17	18	19	20	23	25	27	28
3	64																			
5	74	67																		
6	57	68	53																	
8	26	37	24	25																
9	24	35	35	20	22															
10	123	78	150	66	30	38														
12	20	16	10	17	13	11	13													
13	85	75	137	65	34	23	135	15												
14	105	65	138	43	44	36	201	14	119											
15	109	73	126	52	34	30	167	17	133	165										
16	61	67	105	63	33	28	134	14	96	93	99									
17	100	79	98	46	43	31	203	21	93	149	101	99								
18	75	63	110	48	32	32	184	15	104	115	79	67	91							
19	142	99	205	81	29	33	623	19	183	244	222	177	178	160						
20	130	106	170	69	36	40	808	19	225	234	239	137	198	175	391					
23	158	90	247	54	31	48	660	18	182	284	334	164	252	183	602	711				
25	46	52	47	60	105	109	49	50	45	48	49	50	47	48	43	45	46			
27	180	127	595	91	31	31	583	20	703	703	729	204	718	179	497	506	512	44		
28	112	103	247	63	39	47	478	16	232	279	235	114	182	178	627	796	1403	47	414	
29	118	102	156	53	24	29	203	16	137	158	117	96	142	180	273	343	322	49	401	555
30	62	69	59	83	202	204	59	26	56	56	60	64	60	71	54	54	54	25	53	56
31	25	23	24	27	34	34	22	89	23	23	24	27	22	30	24	23	23	17	21	23
32	193	256	156	302	74	64	141	26	162	149	163	203	158	164	126	128	126	37	117	132
33	63	66	56	84	164	154	53	43	55	53	61	61	59	60	53	53	51	25	55	53
35	537	667	370	145	38	34	288	23	355	336	364	460	367	187	267	260	251	39	231	274
38	113	79	159	57	30	39	372	21	197	141	185	129	198	110	665	736	710	47	658	1172
41	127	89	227	74	32	39	518	17	256	574	244	156	210	186	491	501	521	42	459	530
42	196	207	184	69	44	32	169	16	178	178	183	186	177	185	173	172	174	44	173	170
43	146	83	201	40	39	34	428	15	200	212	195	136	214	89	604	777	1579	47	544	1567
44	115	86	138	58	35	31	244	13	134	181	158	121	207	183	623	750	849	44	596	334
47	69	60	91	47	27	34	107	11	84	97	88	83	94	55	137	125	145	53	154	109
49	99	70	114	85	39	37	183	15	114	110	97	100	112	84	161	229	248	47	705	143
50	67	72	91	50	36	29	134	18	97	107	81	67	124	55	143	294	302	53	296	304
51	72	75	99	61	25	31	157	17	110	119	114	86	88	69	127	135	174	49	232	158
52	161	97	195	68	30	59	345	19	179	187	210	126	199	107	590	644	758	48	411	547
53	117	124	118	64	24	34	114	20	123	122	122	121	112	119	112	109	117	46	116	110
54	133	74	230	58	21	50	258	17	153	163	176	121	183	92	610	782	1070	43	488	787
55	123	88	217	70	41	31	199	15	145	161	160	94	141	92	370	273	348	44	585	344
56	263	284	232	78	42	38	209	22	236	226	229	246	226	175	204	203	205	42	200	211
57	208	223	197	263	39	47	178	17	194	185	190	200	188	178	175	171	173	44	172	181

Bar.	Barramentos																			
	29	30	31	32	33	35	38	41	42	43	44	47	49	50	51	52	53	54	55	56
30	65																			
31	24	20																		
32	158	42	19																	
33	57	29	15	40																
35	361	53	22	96	48															
38	167	58	21	137	52	279														
41	584	55	24	133	54	250	588													
42	186	58	24	110	50	138	179	137												
43	297	56	23	133	55	268	1126	460	168											
44	208	55	25	137	52	283	659	536	175	383										
47	81	67	29	204	61	348	129	124	201	145	100									
49	128	62	25	172	58	363	247	207	186	183	160	74								
50	113	63	28	185	62	265	142	296	181	168	143	82	84							
51	108	61	26	187	60	413	140	132	184	151	158	68	111	85						
52	433	57	21	134	54	306	1058	508	177	648	818	88	170	158	126					
53	104	63	24	107	58	117	124	122	115	109	124	130	123	124	114	101				
54	585	56	22	137	55	293	449	499	174	889	383	124	140	154	124	433	104			
55	151	56	22	147	55	319	237	531	179	301	208	80	160	101	129	584	114	207		
56	241	55	22	104	48	156	218	159	101	200	214	248	233	223	237	209	115	214	216	
57	194	55	21	102	52	137	180	147	47	168	185	202	190	194	195	178	122	174	183	100

Tabela C13 – Resultados das simulações de contingência de linha com a rede de 57 barramentos (indexado por ordem crescente do N° de linha)

Linha/Transformador (com contingência)			Número FC (1)	FSQV		PMC	
Número	Barram. Início	Barram. Fim		Inicial	Final	(%) (2)	Redução (%)
1	1	2	267	1399,8	1141,1	26,6	34,48
2	2	3	311	1446,1	1210,8	31,0	23,65
3	3	4	305	1415,7	1181,9	30,4	25,12
4	4	5	398	1454,9	1202,6	3,97	2,22
5	4	6	391	1454,9	1194	39,0	3,94
6	6	7	405	1449,1	1193,6	40,4	0,49
7	6	8	405	1456,1	1196,7	40,4	0,49
8	8	9	285	1419,8	1124,7	28,4	30,05
9	9	10	406	1456,4	1199,5	40,5	0,25
10	9	11	404	1443,8	1196,1	40,3	0,74
11	9	12	402	1460,8	1197,7	40,1	1,23
12	9	13	403	1455,4	1201	40,2	0,99
13	13	14	401	1422,8	1180,5	40,0	1,48
14	13	15	378	1445,4	1189,3	37,7	7,14
15	1	15	209	1434,7	1202,4	20,8	48,77

Linha/Transformador (com contingência)			Número FC (1)	FSQV		PMC	
Número	Barram. Início	Barram. Fim		Inicial	Final	(%) (2)	Redução (%)
16	1	16	300	1456,7	1199,1	29,9	26,35
17	1	17	279	1447,7	1199	27,8	31,53
18	3	15	397	1434	1181	39,6	2,46
19	4	18	0	0	0	0	100,00
20	4	18	0	0	0	0	100,00
21	5	6	405	1441,9	1187,3	40,4	0,49
22	7	8	379	1434,9	1196,4	37,8	6,90
23	10	12	391	1448,1	1193,1	39,0	3,94
24	11	13	398	1442,8	1192,8	39,7	2,22
25	12	13	390	1422	1182,6	38,9	4,19
26	12	16	344	1443	1198,4	34,3	15,52
27	12	17	329	1455,9	1205,4	32,8	19,21
28	14	15	361	1428,7	1177,9	36,0	11,33
29	18	19	401	1462,9	1214,4	40,0	1,48
30	19	20	405	1463,3	1213,7	40,4	0,49
31	21	20	407	1465,1	1210,5	40,6	0,00
32	21	22	407	1455,1	1202,8	40,6	0,00
33	22	23	362	1371	1212	36,1	11,08
34	23	24	389	1460,6	1246,1	38,8	4,43
35	24	25	0	0	0	0	100,00
36	24	25	0	0	0	0	100,00
37	24	26	378	1423,1	1232,9	37,7	7,14
38	26	27	378	1456	1255,4	37,7	7,14
39	27	28	346	1440,3	1282,5	34,5	15,02
40	28	29	300	1423,6	1281,6	29,9	26,35
41	27	29	102	1388,4	1316,9	10,1	75,12
42	25	30	30	1446,9	1439,3	2,9	92,86
43	30	31	297	1461	1375,7	29,6	27,09
44	31	32	380	1465,7	1289,3	37,9	6,65
45	32	33	430	1446,1	1168	42,9	-5,67
46	34	32	69	1453,6	1438,7	6,8	83,25
47	34	35	69	1437,4	1421,9	6,8	83,25
48	35	36	0	0	0	0	100,00
49	36	37	246	1415,3	1332,3	24,5	39,66
50	37	38	172	1410,7	1338,2	17,1	57,88
51	37	39	405	1430,7	1177	40,4	0,49
52	36	40	408	1439,3	1179,1	40,7	-0,25
53	22	38	376	1410,9	1214,8	37,5	7,64
54	11	41	399	1462,4	1216	39,8	1,97
55	41	42	388	1458,9	1221,7	38,7	4,68
56	41	43	394	1459,6	1216,6	39,3	3,20
57	38	44	380	1436,7	1198,3	37,9	6,65
58	15	45	364	1439,7	1203,7	36,3	10,59
59	14	46	359	1412,4	1190,3	35,8	11,82
60	46	47	359	1418	1194,1	35,8	11,82

Linha/Transformador (com contingência)			Número FC (1)	FSQV		PMC	
Número	Barram. Início	Barram. Fim		Inicial	Final	(%) (2)	Redução (%)
61	47	48	395	1405,3	1168,9	39,4	2,96
62	48	49	406	1454,3	1206,4	40,5	0,25
63	49	50	404	1457,9	1203,8	40,3	0,74
64	50	51	399	1456,2	1213	39,8	1,97
65	10	51	364	1424,8	1211,7	36,3	10,59
66	13	49	379	1437,9	1202,7	37,8	6,90
67	29	52	312	1458,9	1365,1	31,1	23,40
68	52	53	372	1454,6	1268,2	37,1	8,62
69	53	54	400	1460,3	1204,5	39,9	1,72
70	54	55	389	1458,4	1216,1	38,8	4,43
71	11	43	390	1449,9	1205,2	38,9	4,19
72	44	45	364	1447	1207,3	36,3	10,59
73	40	56	408	1467,6	1199,5	40,7	-0,25
74	56	41	402	1464	1216,2	40,1	1,23
75	56	42	407	1462,9	1202,1	40,6	0,00
76	39	57	405	1466,6	1203,6	40,4	0,49
77	57	56	405	1461,7	1210,3	40,4	0,49
78	38	49	404	1455,5	1208,3	40,3	0,74
79	38	48	392	1428,7	1204,5	39,1	3,69
80	9	55	320	1442,6	1331,1	31,9	21,43
Sem contingências			407	1467,1	1213,8	40,6	-
(1) – Até ao colapso (2) – Crescimento de cargas em relação às cargas base da rede de simulação							

Tabela C14 – Resultados das simulações de contingência de linha com a rede de 57 barramentos (indexado por ordem decrescente da redução do PMC)

Linha/Transformador (com contingência)			Número FC (1)	FSQV		PMC	
Número	Barram. Início	Barram. Fim		Inicial	Final	(%) (2)	Redução (%)
19	4	18	0	0	0	0	100,00
20	4	18	0	0	0	0	100,00
35	24	25	0	0	0	0	100,00
36	24	25	0	0	0	0	100,00
48	35	36	0	0	0	0	100,00
42	25	30	30	1446,9	1439,3	2,9	92,86
46	34	32	69	1453,6	1438,7	6,8	83,25
47	34	35	69	1437,4	1421,9	6,8	83,25
41	7	29	102	1388,4	1316,9	10,1	75,12
50	37	38	172	1410,7	1338,2	17,1	57,88

Linha/Transformador (com contingência)			Número FC (1)	FSQV		PMC	
Número	Barram. Início	Barram. Fim		Inicial	Final	(%) (2)	Redução (%)
15	1	15	209	1434,7	1202,4	20,8	48,77
49	36	37	246	1415,3	1332,3	24,5	39,66
1	1	2	267	1399,8	1141,1	26,6	34,48
17	1	17	279	1447,7	1199	27,8	31,53
8	8	9	285	1419,8	1124,7	28,4	30,05
43	30	31	297	1461	1375,7	29,6	27,09
16	1	16	300	1456,7	1199,1	29,9	26,35
40	28	29	300	1423,6	1281,6	29,9	26,35
3	3	4	305	1415,7	1181,9	30,4	25,12
2	2	3	311	1446,1	1210,8	31,0	23,65
67	29	52	312	1458,9	1365,1	31,1	23,40
80	9	55	320	1442,6	1331,1	31,9	21,43
27	12	17	329	1455,9	1205,4	32,8	19,21
26	12	16	344	1443	1198,4	34,3	15,52
39	27	28	346	1440,3	1282,5	34,5	15,02
59	14	46	359	1412,4	1190,3	35,8	11,82
60	46	47	359	1418	1194,1	35,8	11,82
28	14	15	361	1428,7	1177,9	36,0	11,33
33	22	23	362	1371	1212	36,1	11,08
58	15	45	364	1439,7	1203,7	36,3	10,59
65	10	51	364	1424,8	1211,7	36,3	10,59
72	44	45	364	1447	1207,3	36,3	10,59
68	52	53	372	1454,6	1268,2	37,1	8,62
53	22	38	376	1410,9	1214,8	37,5	7,64
14	13	15	378	1445,4	1189,3	37,7	7,14
37	24	26	378	1423,1	1232,9	37,7	7,14
38	26	27	378	1456	1255,4	37,7	7,14
22	7	8	379	1434,9	1196,4	37,8	6,90
66	13	49	379	1437,9	1202,7	37,8	6,90
44	31	32	380	1465,7	1289,3	37,9	6,65
57	38	44	380	1436,7	1198,3	37,9	6,65
55	41	42	388	1458,9	1221,7	38,7	4,68
34	23	24	389	1460,6	1246,1	38,8	4,43
70	54	55	389	1458,4	1216,1	38,8	4,43
25	12	13	390	1422	1182,6	38,9	4,19
71	11	43	390	1449,9	1205,2	38,9	4,19
5	4	6	391	1454,9	1194	39,0	3,94
23	10	12	391	1448,1	1193,1	39,0	3,94
79	38	48	392	1428,7	1204,5	39,1	3,69
56	41	43	394	1459,6	1216,6	39,3	3,20
61	47	48	395	1405,3	1168,9	39,4	2,96
18	3	15	397	1434	1181	39,6	2,46

Linha/Transformador (com contingência)			Número FC (1)	FSQV		PMC	
Número	Barram. Início	Barram. Fim		Inicial	Final	(%) (2)	Redução (%)
4	4	5	398	1454,9	1202,6	39,7	2,22
74	56	41	402	1464	1216,2	40,1	1,23
12	9	13	403	1455,4	1201	40,2	0,99
10	9	11	404	1443,8	1196,1	40,3	0,74
63	49	50	404	1457,9	1203,8	40,3	0,74
78	38	49	404	1455,5	1208,3	40,3	0,74
6	6	7	405	1449,1	1193,6	40,4	0,49
7	6	8	405	1456,1	1196,7	40,4	0,49
21	5	6	405	1441,9	1187,3	40,4	0,49
30	19	20	405	1463,3	1213,7	40,4	0,49
51	37	39	405	1430,7	1177	40,4	0,49
76	39	57	405	1466,6	1203,6	40,4	0,49
77	57	56	405	1461,7	1210,3	40,4	0,49
9	9	10	406	1456,4	1199,5	40,5	0,25
62	48	49	406	1454,3	1206,4	40,5	0,25
31	21	20	407	1465,1	1210,5	40,6	0,00
32	21	22	407	1455,1	1202,8	40,6	0,00
75	56	42	407	1462,9	1202,1	40,6	0,00
52	36	40	408	1439,3	1179,1	40,7	-0,25
73	40	56	408	1467,6	1199,5	40,7	-0,25
45	32	33	430	1446,1	1168	42,9	-5,67
24	11	13	398	1442,8	1192,8	39,7	2,22
54	11	41	399	1462,4	1216	39,8	1,97
64	50	51	399	1456,2	1213	39,8	1,97
69	53	54	400	1460,3	1204,5	39,9	1,72
13	13	14	401	1422,8	1180,5	40,0	1,48
29	18	19	401	1462,9	1214,4	40,0	1,48
11	9	12	402	1460,8	1197,7	40,1	1,23
(1) – Até ao colapso (2) – Crescimento de cargas em relação às cargas base da rede de simulação							

